

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV METROLOGIE A ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF METROLOGY AND QUALITY ASSURANCE TESTING

## OPTIMALIZACE VÝROBNÍHO PROCESU PRODUCTION PROCESS OPTIMIZATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ALEŠ HEJZLAR

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. ALOIS FIALA, CSc.

BRNO 2008



## ANOTACE

Aleš Hejzlar

*Optimalizace výrobního procesu*

Diplomová práce, Ústav metrologie a zkušebnictví, VUT - FSI v Brně

Tato diplomová práce se věnuje optimalizaci procesu výroby. V práci je vyložena problematika třískového obrábění a soustružení. V praktické části je analyzován proces výroby, navrhnout a vyhodnocen plánovaný experiment (DOE). Na konci praktické části je provedeno hodnocení obráběného materiálu z hlediska mikrostruktury. Na podkladě dílčích zjištění jsou učiněny závěry a navržnuta doporučení vedoucí k optimalizaci výroby.

## KLÍČOVÁ SLOVA

optimalizace, výroba, proces, obrábění, soustružení, experiment, DOE, materiál, mikrostruktura, metalografie

## ANNOTATION

Aleš Hejzlar

*Production process optimization*

Diploma thesis, Institute of Metrology and Quality Assurance Testing, Brno UT - FME

This diploma thesis deals with the production process optimization. The cutting operation and the lathe-turning issue is described in this thesis. In the practical part the production process is analyzed, the designed experiment (DOE) is suggested and evaluated. In the end of the practical part there is the evaluation of the machined material in the light of microstructure. On the basis of the partial findings the enclosures are done and the recommendations leading to the production optimization are suggested.

## KEYWORDS

production, process, optimization, cutting operation, lathe-turning, experiment, DOE, material, microstructure, metallography

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HEJZLAR, A. *Optimalizace výrobního procesu*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 75 s., 11 s. příl. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Alois Fiala, CSc.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce, s využitím uvedené odborné literatury a pramenů.

V Brně dne 20. 5. 2008

.....  
podpis

## PODĚKOVÁNÍ

Za cenné rady při zpracování diplomové práce děkuji doc. Ing. Aloisi Fialovi, CSc. Za pomoc při testech materiálů děkuji doc. Ing. Bohumilu Pacalovi, CSc. Dále děkuji zaměstnancům firmy Mesa Parts, s.r.o., bez jejichž pomoci by práce nemohla vzniknout. A v neposlední řadě všem, u kterých jsem našel cennou pomoc a rady při řešení dané problematiky.

## OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI .....</b>	<b>12</b>
1.1 HISTORIE.....	12
1.2 KOMPETENCE .....	12
<b>2 TŘÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ .....</b>	<b>14</b>
2.1 ZÁKLADY .....	14
2.2 BŘIT NÁSTROJE.....	14
2.3 PLOCHY A ÚHLÝ ŘEZNÉHO KLÍNU.....	14
2.4 ŘEZNÉ MATERIÁLY.....	15
2.4.1 Požadavky na řezný materiál.....	15
2.4.2 Volba řezných materiálů .....	16
2.4.3 Složení slinutých karbidů .....	16
2.4.4 Povlakování slinutých karbidů.....	16
2.5 ŘEZNÉ KAPALINY.....	18
2.5.1 Funkce řezné kapaliny .....	18
2.5.2 Druhy řezných kapalin .....	18
<b>3 SOUSTRUŽENÍ.....</b>	<b>20</b>
3.1 SOUSTRUŽNICKÉ POSTUPY.....	20
3.2 POHYBY A VELIČINY PŘI SOUSTRUŽENÍ .....	21
3.3 GEOMETRIE BŘITU SOUSTRUŽNICKÝCH NÁSTROJŮ.....	21
3.4 TVORBA TŘÍSKY PŘI SOUSTRUŽENÍ .....	24
3.4.1 Druhy třísek .....	25
3.4.2 Tvary třísek.....	25
3.4.3 Utvářeče třísek a tvary třísek .....	26
3.5 OPOTŘEBENÍ A TRVANLIVOST .....	27
3.5.1 Příčiny opotřebení.....	27
3.5.2 Druhy opotřebení .....	28
3.6 SOUSTRUŽNICKÉ NÁSTROJE .....	30
3.6.1 Volba držáku a vyměnitelné břitové destičky .....	30
3.6.2 Tvar a velikost vyměnitelných břitových destiček.....	31
3.6.3 Upínání vyměnitelných břitových destiček .....	32
3.6.4 Označování vyměnitelných břitových destiček .....	32
3.7 UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ A OBROBKŮ .....	33
3.7.1 Upínání soustružnických nástrojů .....	33
3.7.2 Upínání obrobku .....	33
3.8 SOUSTRUHY .....	35
<b>4 DÍLEC VENTILKOLBEN CRI.....</b>	<b>36</b>
4.1 DÍLCE VENTILKOLBEN CRI VŠEOBECNĚ .....	36
4.1.1 Použití.....	36
4.1.3 Kritické ukazatele.....	37
4.2 IDENTIFIKACE PROCESU VÝROBY DÍLCE VENTILKOLBEN .....	38
4.2.1 Procesní mapa.....	38
4.2.2 Příprava .....	39

4.2.3	Výroba .....	39
4.2.4	Výstupní kontrola .....	40
4.2.5	Expedice .....	40
4.3	TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ .....	41
4.4	PROBLÉMY PŘI SOUSTRUŽENÍ .....	43
4.4.1	Zmetkovitost .....	43
4.4.2	Možné příčiny zmetkovitosti .....	43
<b>5</b>	<b>PLÁNOVANÝ EXPERIMENT (DOE) .....</b>	<b>45</b>
5.1	PŘÍPRAVA PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU .....	45
5.1.1	Faktory .....	45
5.1.2	Odezvy .....	45
5.1.3	Pokyny pro obsluhu strojů .....	46
5.2	MĚŘENÍ ODEZEV .....	46
5.2.1	Měření indexu strojní způsobilosti .....	46
5.2.2	Měření hloubky drsnosti povrchu .....	47
5.2.3	Měření opotřebení nástroje .....	48
5.3	VYHODNOCENÍ PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU .....	51
5.3.1	Vyhodnocení odezvy $c_m$ .....	51
5.3.2	Vyhodnocení odezvy $R_{max}$ .....	53
5.3.3	Diskuze výsledků .....	54
<b>6</b>	<b>TESTY MATERIÁLŮ .....</b>	<b>55</b>
6.1	OBRÁBĚNÝ MATERIÁL .....	55
6.1.1	Rychlořezné oceli všeobecně .....	55
6.1.2	Vlastnosti rychlořezné oceli 19 830 .....	55
6.1.3	Problematika karbidické fáze .....	57
6.2	METALOGRAFIE OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU .....	58
6.2.1	Příprava metalografických preparátů ze vzorku šarží .....	58
6.2.2	Hodnocení metalografických výbrusů .....	60
6.2.3	Porovnání mikrostruktury materiálůvých vzorků .....	62
6.2.4	Diskuze výsledků k metalografický výbrusům .....	63
6.3	ZKOUŠKY TVRDOSTI .....	63
6.3.1	Metody plastické interakce materiál – vnikací těleso .....	63
6.3.2	Diskuze výsledků k tvrdosti .....	65
6.4	METALOGRAFIE OBRÁBĚCÍCH NÁSTROJŮ .....	65
6.4.1	Slinuté karbidy .....	65
6.4.2	Příprava metalografických preparátů .....	65
6.4.3	Hodnocení metalografických výbrusů .....	66
6.4.4	Porovnání mikrostruktury nástrojů .....	67
6.4.5	Diskuze výsledků .....	68
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>75</b>

## ÚVOD

Jako každá moderní společnost se i Mesa Parts snaží snižovat náklady na výrobu a zvyšovat výkonnost procesu při udržení vysoké kvality produkovaných dílců. Tato diplomová práce se zabývá optimalizací procesu výroby dílce ventilkolben CRI.

Cílem práce je na základě analýzy procesu výroby vytipovat faktory ovlivňující proces a pomocí plánovaného experimentu zjistit jejich vliv na proces výroby. Na základě výsledků učinit hodnocení a navrhnout příslušná opatření vedoucí k optimalizování výroby.

První část práce se věnuje teorii soustružení. Jsou zde uvedeny základní pojmy z teorie soustružení. Na několika praktických obrázcích jsou popsány nejčastější problémy při třískovém obrábění soustružením a jejich negativním vlivu na kvalitu obráběných dílců a opotřebení nástrojů. Z této teoretické přípravy je v dalších částech práce čerpáno.

Další část obsahuje seznámení s dílcem ventilkolben CRI. Je zde uveden popis technologie výroby, používaných strojů a nástrojů.

V praktické části je analyzován proces výroby pomocí nástrojů kvality. Na základě zjištěných údajů byly vytipovány faktory ovlivňující proces a sledované znaky (odezvy) procesu, následně byl proveden plánovaný experiment (DOE). Na konci praktické části bylo provedeno hodnocení metalografických výbrusů obráběných materiálů a používaných nástrojů.

V závěru jsou sumarizovány a vyhodnoceny dílčí výsledky vyplývající z praktické části. Jsou zde uvedeny doporučení a návrhy dalšího postupu pro optimalizování a odhalování vstupů do procesu výroby dílce ventilkolben CRI.

## 1 PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI



Obrázek 1. Logo společnosti

### 1.1 Historie

Společnost Mesa Parts byla založena v roce 1896. Je rodinným podnikem střední velikosti, který je veden již ve čtvrté generaci. V dnešní době má dva závody, v německém Lenzkirchu a ve Vysokově u Náchoda. Sídlo společnosti je v Lenzkirchu. Na moderních strojích tam pracuje asi 430 zaměstnanců. Mimo to se tam nacházejí centrální oddělení pro prodej, logistiku a inženýring. Provoz v České republice zahájil výrobu v roce 1993 a v současnosti zde pracuje okolo 250 zaměstnanců.



Obrázek 2. Závod ve Vysokově u Náchoda

Mesa parts je předním partnerem pro výrobu náročných rotačních soustružených dílů a konstrukčních celků. Společnost má zaveden systém managementu jakosti dle ISO/TS 16949:2002 a nově také systém enviromentálního managementu dle ISO 14001:2004.

V roce 1997 činil obrat společnosti 24,8 milionů eur, postupně se vyšplhal až na 60,8 milionů eur v roce 2005. Také v následujících letech lze počítat s pokračováním tohoto trendu.

### 1.2 Kompetence

Mesa Parts zpracovává všechny obrobitelné materiály. Specializuje se ale na rotační soustružené díly a konstrukční celky do průměru 35 mm. Galvanické povrchy i termické úpravy nechává provádět ve specializovaných externích firmách.

Přesné rotační díly se uplatňují v různých oblastech jako je například:

- vstřikovací technika
- brzdová technika ABS
- senzorová technika
- řízení motoru
- řídicí a regulační technika
- technika pohonu
- technika ventilů
- elektrotechnika
- zdravotnická technika



Obrázek 3. Ukázka dílců vyráběných společností Mesa Parts

## 2 TŘÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ [1]

K třískovému obrábění (pevným nástrojem) patří řezání, pilování, zaškrabávání, vrtání, řezání závitů, vystružování, soustružení, frézování, obrážení, hoblování, protahování a broušení. Pevný obrobek je možné také opracovávat volným brusivem, elektroerozivně nebo laserem.

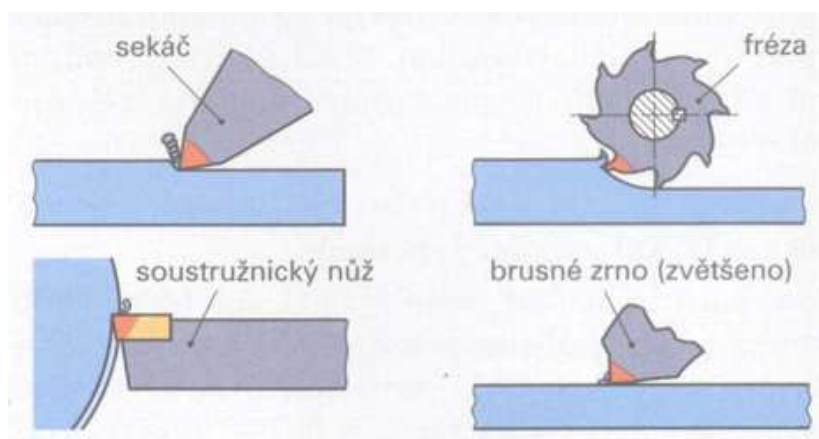
### 2.1 Základy

Při všech způsobech třískového obrábění pevným nástrojem jsou velmi důležité:

- tvar břitu nástroje a tím tvorba třísky,
- síly a teploty na břitu nástroje,
- odolnost nástroje proti opotřebení.

### 2.2 Břit nástroje

Základním tvarem břitu všech nástrojů je klín. Síly a teploty provázející obrábění způsobují opotřebení (změnu tvaru) břitu. Materiál nástroje proto musí být dostatečně pevný a tvrdý i při pracovních teplotách.



Obrázek 4. Klínovitý tvar břitů nástrojů

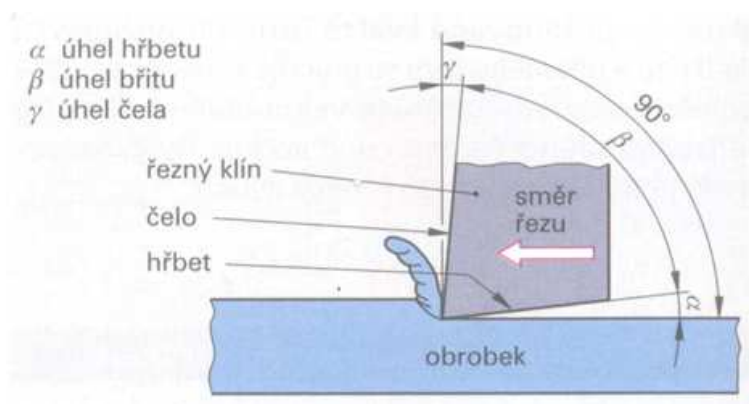
### 2.3 Plochy a úhly řezného klínu

Řezný klín, vnikající do měkčího materiálu, je tvořen plochou čela a plochou hřbetu. Úhel mezi těmito plochami se nazývá **úhel břitu  $\beta$**  (beta). Jeho velikost se řídí vlastnostmi obráběného materiálu. Břit nástroje vniká do materiálu tím snadněji (menší silou), čím menší je jeho úhel. Pokud nemá docházet při obrábění houževnatějšího materiálu k vylamování materiálu z břitu nože, nesmí být úhel břitu příliš malý.

**Úhel čela  $\gamma$**  (gama) je úhel mezi plochou čela a kolmicí k obráběné ploše. Ovlivňuje tvorbu třísky. Musí mít alespoň malou kladnou hodnotu, aby nebylo velké tření mezi nožem a obráběným materiálem. Úhel se volí jen tak velký, aby plocha hřbetu nebránila plynulosti řezu. Při obrábění tvrdých a křehkých materiálů a při přerušovaném řezu se volí úhel čela malý nebo záporný.



**Úhel hřbetu  $\alpha$**  (alfa) mezi plochou hřbetu a obráběnou plochou je nezbytný pro snížení tření mezi nástrojem a obrobkem. Musí být tak velký, aby nástroj dostatečně volně řezal.



Obrázek 5. Plochy a úhly na řezném klínu

Tabulka 1. Úhly řezného klínu

Úhel břitu $\beta$		Úhel čela $\gamma$		Úhel hřbetu $\alpha$	
velký	malý	malý	velký	malý	větší
tvrdé materiály s větší pevností, např. vysoce legované oceli	měkké materiály, např. hliníkové slitiny	tvrdé a křehké materiály, při přerušovaném řezu a při hrubování	měkké materiály, při obrábění načisto (dokončování)	tvrdé materiály s krátkou třískou, např. vysoce legované oceli	měkké, plasticky tvárné materiály, např. plasty

## 2.4 Řezné materiály

Řezný materiál je materiál břitu nástroje pro třískové obrábění. Může se jednat o materiál kompaktního nástroje, břitové destičky nebo zrna brusného kotouče.

### 2.4.1 Požadavky na řezný materiál

Břit obráběcího nástroje je mechanicky a tepelně velmi namáhán a toto namáhání může vést opotřebení nebo k vylomení části nástroje.



Obrázek 6. Druhy namáhání řezných nástrojů

## 2.4.2 Volba řezných materiálů

Volba řezného materiálu se řídí druhem obrábění, obráběným materiálem a hospodárností (cenou nástroje). Důležitými vlastnostmi pro volbu materiálu nástroje jsou otěruvzdornost a houževnatost, tedy tvrdost a pevnost. Povlakováním slinutých karbidů (tvrdokovu) a rychlořezných ocelí se zlepší tvrdost a tím i odolnost proti opotřebení. Oblasti použití nástrojů pro třískové obrábění se řídí jejich tvrdostí (otěruvzdorností), houževnatostí a také cenou.

## 2.4.3 Složení slinutých karbidů

Slinutý karbid (tvrdokov) je označení pro spékaný (slinutý, sintrovaný) materiál z prášků výchozích surovin. Tvrdokov zajišťuje karbid wolframu  $W_2C$  a houževnatým pojivem je kobalt. Pro zlepšení otěruvzdornosti při vysokých teplotách slouží přísady karbidu titanu a karbidu tantalu. Podíl tvrdých karbidů ve složení SK je mezi 80 % a 90 %. Pro obrábění různých materiálů se vyrábějí SK různých vlastností, liší se složením, zrnitostí a případně povlakováním.

Nástroje ze slinutých karbidů	
	
Vlastnosti	Oblasti použití
<ul style="list-style-type: none"><li>• velká teplotní odolnost (do 1 000 °C)</li><li>• velká otěruvzdornost</li><li>• velká pevnost v tlaku</li><li>• schopnost tlumit vibrace</li></ul>	<p>výměnné břitové destičky pro frézovací a soustružnické nástroje a vrtáky, celokarbidové nástroje tlumící vibrace pro obrábění téměř všech materiálů.</p>

Obrázek 7. Vlastnosti a použití slinutých karbidů

Velký podíl tvrdých kovových karbidů zvyšuje otěruvzdornost tvrdokovů. Vyšší podíl spojovacího kovu (kobaltu) zlepšuje houževnatost. Tvrdost a houževnatost lze také ovlivnit příměsí karbidů s jemnější zrnitostí do 10  $\mu\text{m}$ .

Jemnozrnné slinuté karbidy (s velikostí zrna do 2,5  $\mu\text{m}$ ) mají lepší otěruvzdornost i odolnost hran proti vylamování. Používají se k obrábění vytvrzených materiálů (např. kalené oceli).

## 2.4.4 Povlakování slinutých karbidů

Cílem povlakování je zvýšení odolnosti proti otěru. Vyšší teplota, vyšší řezné rychlosti, větší průřez třísky a tím větší obráběcí výkon (měřený objemem odebraného materiálu za jednotku času). K hlavním materiálům pro tvrdé povlaky řezných nástrojů patří nitrid titanu (TiN), karbid titanu (TiC), karbonitrid titanu (TiCN), a oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ ) a diamant (C, v krychlové krystalické podobě). Povlaky mají svá charakteristická zbarvení. Povlak může být vytvořen jednou nebo více vrstvami

2 až 15  $\mu\text{m}$ . Nitrid titanu se pro malý koeficient tření používá v horní krycí vrstvě. Oxid hlinitý (odpovídá tvrdosti přírodním drahokamům korund, rubín nebo safír) tvoří tvrdou vrstvu a slouží zároveň jako tepelná izolace a izolace chemického působení obráběného materiálu na nástroj. Karbonitrid titanu má velmi dobrou soudržnost s materiály nástrojů, proto se při povlakování používá jako základní vrstva. Povlakování se používá pro nástroje z rychlořezné oceli, slinutých karbidů a cermetů.



Obrázek 8. Vícevrstvé povlakování slinutých karbidů

#### 2.4.5 Rozdělení slinutých karbidů

Slinuté karbidy se dělí do tří hlavních skupin P, M a K. Volba druhu karbidu se řídí podle obráběného materiálu. Na houževnatém materiálu nebo při přerušovaném řezu by se tvrdý a křehký břit lámal a na tvrdém materiálu by se brzy otupil houževnatější, ale měkčí břit. Hlavní skupiny se dělí do podskupin označovaných dvojciferným číslem. S rostoucím číslem roste výkonnost, tj. vhodnost pro velkou třísku při hrubování. Čím menší je číslo, tím větší je otěruvzdornost materiálu (např. v označení P01). Tyto SK se používají pro výrobu nástrojů dokončovacímu obrábění s malou hloubkou záběru a velkou řeznou rychlostí. Větší číslo v označení znamená větší houževnatost a větší vhodnost pro hrubování s velkou hloubkou záběru a velkým posuvem.

Tabulka 2. Rozdělení slinutých karbidů

Hlavní skupina		Použití	Vlastnosti
<b>P</b> Pro materiály s dlouhou třískou, např. ocel, temperovanou litinu	01	dokončování	50 → 01 Rostoucí tvrdost/otěruvzdornost
	10		
	20	kopírovací soustružení	01 → 50 Rostoucí houževnatost
	30		
	40	hrubování	
<b>M</b> Pro materiály s dlouhou i krátkou třískou např. nerezavějící nebo automatové oceli	50		
	10	dokončování	50 → 01 Rostoucí tvrdost/otěruvzdornost
	20	kopírovací soustružení	01 → 50 Rostoucí houževnatost
	30		
<b>K</b> Pro materiály s krátkou třískou, např. litinu, neželezné kovy, kalenou ocel	40	hrubování	
	01	dokončování	50 → 01 Rostoucí tvrdost/otěruvzdornost
	10	kopírovací soustružení	01 → 50 Rostoucí houževnatost
	20		
	30	hrubování	

## 2.5 Řezné kapaliny

Řezná kapalina je pomocná látka, usnadňující svými chladícími a mazacími účinky třískové obrábění. Nazývá se také obráběcí kapalina.

### 2.5.1 Funkce řezné kapaliny

Hlavní funkce řezné kapaliny jsou chlazení a mazání nástroje a obrobku při třískovém obrábění. Kromě toho má řezná kapalina ještě další funkce. Vyplavuje např. třísky vystupující z otvoru při vrtání nebo odplavuje třísky při frézování drážky. Obráběná plocha je tak čištěna a krátkodobě chráněna před korozí. Řezná kapalina snižuje teplotu nástroje, obrobku i stroje, prodlužuje životnost nástroje a zlepšuje kvalitu obrobeného povrchu.



Obrázek 9. Funkce a účinky chladicí řezné kapaliny

### 2.5.2 Druhy řezných kapalin

Řezné kapaliny se dělí do dvou hlavních skupin:

- řezné oleje (bez přídavku vody),
- řezné emulze (oleje ve vodě).

**Řezné oleje** jsou většinou minerální oleje s přísadami (např. 5 až 25 % mýdla u vrtacích olejů). Mají dobré mazací schopnosti a poskytují antikorozní ochranu. Jejich chladící schopnosti jsou však kvůli špatné tepelné vodivosti menší než u emulzí mísitelných s vodou.

Volba řezné kapaliny závisí na druhu obrábění materiálu obrobku, materiálu nástroje a na parametrech obrábění. Důležitý je také tlak, pod kterým se řezná kapalina dostává k ostří. Vedle chlazení a mazání ostří přispívá k odvádění třísek.

Tabulka 3. Volba řezné kapaliny

Druh kapaliny	Použití
<b>Emulze</b> Chladicí účinky převažují nad mazacími účinky	<ul style="list-style-type: none"><li>• při vysokých řezných teplotách</li><li>• při soustružení, frézování, vrtání</li><li>• pro lehce obrobitelné materiály</li></ul>
<b>Řezné oleje</b> Mazací účinky převažují nad chladicími účinky	<ul style="list-style-type: none"><li>• při menších řezných rychlostech</li><li>• pro vytvoření kvalitního povrchu</li><li>• pro těžko obrobitelné materiály</li></ul>



### 3 SOUSTRUŽENÍ [1]

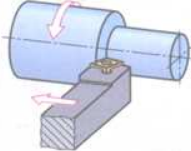
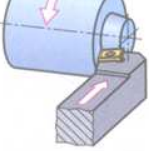
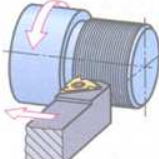
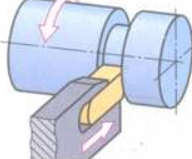
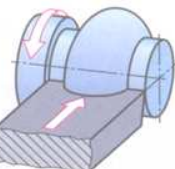
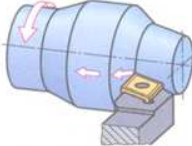
Soustružení patří do třískového obrábění. Je to metoda používaná pro zhotovení součásti rotačních tvarů, při níž se většinou používají jednobřité nástroje různého provedení. Z mnoha hledisek představuje soustružení nejjednodušší způsob obrábění a také velmi frekventovanou metodu. [2]

#### 3.1 Soustružnické postupy

Podle druhu obráběné plochy rozlišujeme:

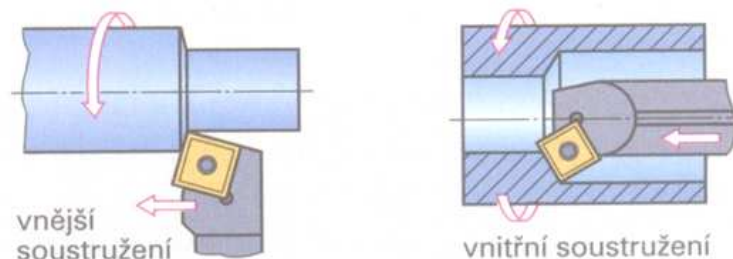
- opracovávání válcových ploch (většinou posuvem břitu v podélné ose rovnoběžné s osou rotace),
- opracování rovinných, resp. čelních ploch (většinou pohybem kolmým k ose rotace),
- provádění (obrábění) zápichu,
- soustružení profilovým nástrojem,
- tvarové soustružení při pohybu nástroje v obou osách.

Tabulka 4. Soustružnické postupy

Postup/příklad	Popis, použití	Postup/příklad	Popis, použití
<b>Soustružení válcových ploch</b> 	Válcová plocha může být vytvořena při podélném posuvu nebo i příčným posuvem širokého břitu, rovnoběžného s osou rotace.	<b>Soustružení rovinných ploch</b> 	Rovinná plocha kolmá k ose rotace může být vytvořena při příčném posuvu nebo i podélným posuvem břitu kolmého k ose rotace.
<b>Soustružení závitů</b> 	Závit se soustruží nožem tvaru profilu závitu při podélném posuvu odpovídajícím stoupání závitu.	<b>Zapichování, upichování</b> 	zápich je drážka, vytvořená většinou jen příčným pohybem nože. Upíchnutí je oddělení materiálu zápichem až k ose.
<b>Soustružení profilů</b> 	Profil tvarového nože může být přenesen do obrobku příčným (obrázek) nebo podélným pohybem	<b>Soustružení složitých rotačních ploch</b> 	Při soustružení kuželových nebo složitě tvarovaných rotačních ploch na NC soustruhu jsou spřaženy posuvy v obou směrech.

Podle umístění obráběné plochy rozlišujeme soustružení na:

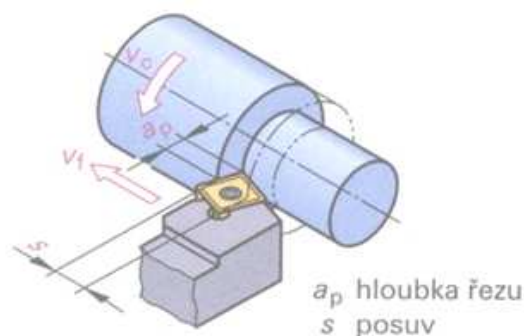
- vnější,
- vnitřní.



Obrázek 10. Soustružení vnější a vnitřní plochy

### 3.2 Pohyby a veličiny při soustružení

Při soustružení dochází k odběru třísky při rotačním pohybu materiálu a posuvném pohybu řezného nástroje.



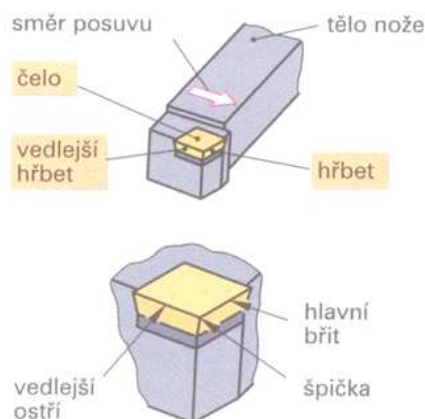
Obrázek 11. Veličiny obrábění při soustružení

**Řezná rychlost  $v_c$**  se volí hlavně podle obrobitelnosti materiálu obrobku a podle otěruvzdornosti nástroje a teplotní odolnosti materiálu břitu nástroje.

**Posuv  $s$**  je dráha nástroje během jedné otáčky obrobku, při hrubování je posuv velký, při chlazení je posuv malý. **Přísuvem** (příčným posuvem) před odebráním další vrstvy při podélném posuvu je určena **hloubka řezu  $a_p$** .

### 3.3 Geometrie břitu soustružnických nástrojů

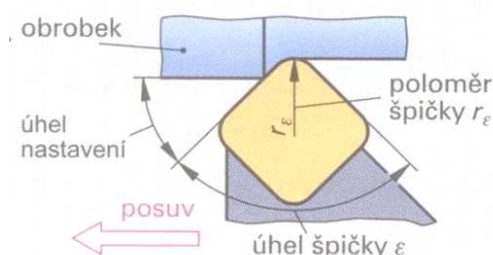
Řezný klín soustružnického nože je tvořen plochou čela a plochou hřbetu. Společná hrana těchto ploch tvoří **hlavní břit**, který leží kolmo ke směru posuvu odebrává podstatnou část třísek. Hlavní břit přechází přes zaoblenou špičku do **vedlejšího břitu**.



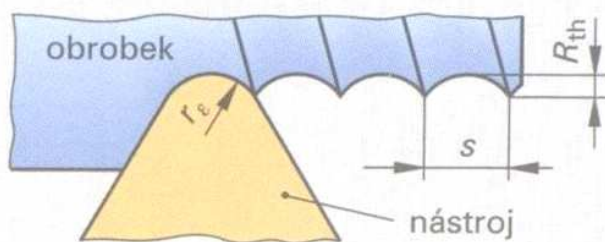
Obrázek 12. Plochy a břity soustružnického nože

Hlavní a vedlejší břit svírají **úhel špičky**  $\varepsilon$  (epsilon), který by měl být co největší kvůli lepší pevnosti nože a lepšímu odvodu tepla. Špička je zaoblena, aby se nelámala. Poloměr zaoblení bývá od 0,4 mm do 2,5 mm. **Poloměr zaoblení špičky**  $r_\varepsilon$  a **posuv**  $s$  jsou určující pro hloubku drsnosti (hloubka šroubovitě rýhy po noži). **Teoretickou hloubku drsnosti**  $R_{th}$  lze vypočítat pomocí vzorce.

$$R_{th} = \frac{s^2}{8 \cdot r_\varepsilon} \quad (1)$$



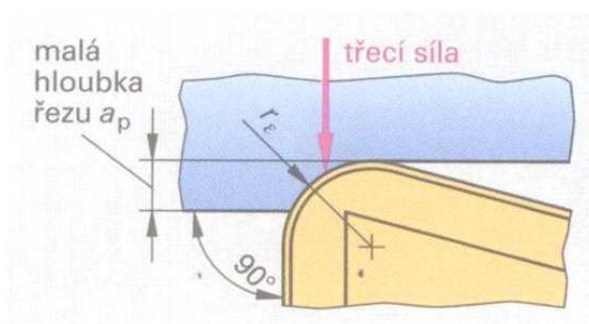
Obrázek 13. Špička soustružnického nože



Obrázek 14. Vliv poloměru špičky na hloubku drsnosti

Pro hrubování je třeba kvůli většímu namáhání břitu volit nůž s větším úhlem špičky a větším poloměrem zaoblení špičky než při hlazení. Větší poloměr špičky umožňuje dosáhnout při stejném posuvu menší hloubky drsnosti povrchu, než při menším poloměru zaoblení. Přesto se však k hlazení používají nože s malým poloměrem špičky a tím i větší styčná plocha s materiálem, což způsobuje větší tření a větší třecí síla  $F_p$  může způsobit chvění a následné zhoršení kvality povrchu obráběné plochy.





Obrázek 15. Poloměr špičky při hlazení

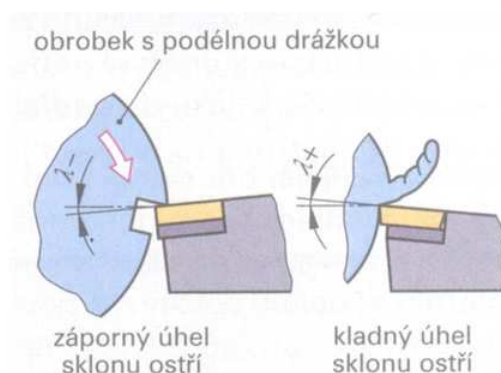
### Tvar břitu

Přechod mezi hřbetem a čelem řezného nástroje ovlivňuje významně jeho trvanlivost. Pro různé soustružnické práce, lišící se hlavně zatížením nástroje, má proto břit řezného klínu různé provedení.

Tabulka 5. Tvary profilu břitu a jejich použití

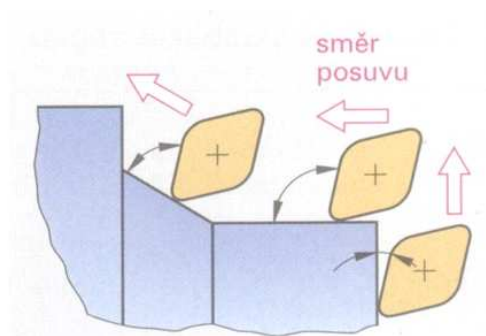
Ostrý břit	Zaoblený břit	Břit s fazetkou	Břit s fazetkou a zaoblením
provedení F	provedení E	provedení T	provedení S
nejmenší řezná síla nebezpečí lomu	ochrana břitu, povlakované břítové destičky mají vždy alespoň malé zaoblení	větší pevnost břitu, umožňuje větší řeznou sílu než ostrý břit	největší bezpečnost proti lomu a současně zvýšení řezné síly a odolnosti proti přehřívání a chvění
hlazení, obrábění plastů	obrábění oceli, přerušovaný řez	obrábění tvrzené oceli a tvrzené litiny	pro nejtěžší řezné podmínky

**Úhel sklonu ostří  $\lambda$  (lambda)** je úhel mezi hlavním ostřím a rovinou kolmou ke směru řezu a ovlivňuje tvorbu třísky. Úhel sklonu ostří je kladný stoupá-li hrana ostří proti směru řezu směrem ke špičce. Kladný úhel zlepšuje odchod třísek, záporný úhel zlepšuje trvanlivost břitu.



Obrázek 16. Úhel sklonu ostří

**Úhel nastavení  $\kappa$  (kapa)** je úhel mezi hlavním břitem a povrchovou přímkou obráběné plochy. Ovlivňuje tvorbu a lámání třísek a poměr složek řezné síly. Úhel nastavení se volí podle tvaru nože a tvaru obráběné kontury. Volba úhlu nastavení souvisí s volbou tvaru nástroje a volbou úhlu špičky nože.



Obrázek 17. Úhel nastavení při tvarovém obrábění

Tabulka 6. Úhel nastavení při různých typech soustružení

$\kappa = 0^\circ \dots 30^\circ$	$\kappa = 45^\circ \dots 75^\circ$	$\kappa = 90^\circ$	$\kappa > 90^\circ$
Velká řezná síla vyžaduje stabilní upnutí nástroje i obrobku a pevnou konstrukci stroje.	Tvar chrání břit před poškozením při najiždění do řezu.	Malá řezná síla a malé prohnutí obrobku, malý sklon ke kmitání.	Vysunutá hrana je ohrožena lomem, nůž snese jen malé zatížení.
obrábění tvrdých materiálů, hlazení s velkým posuvem	hrubování	hlazení, vnitřní obrábění	tvarové obrábění, obrábění zápichů

### 3.4 Tvorba třísky při soustružení

Při vnikání řezného klínu do obráběného materiálu je materiál před klínem nejprve silně zhutňován. Při překročení meze pevnosti dochází k plastické deformaci materiálu, která končí odtržením. Vysoká teplota a tlak způsobují sváření deformovaného materiálu a jeho odstřihování od obráběné plochy ve formě třísek.

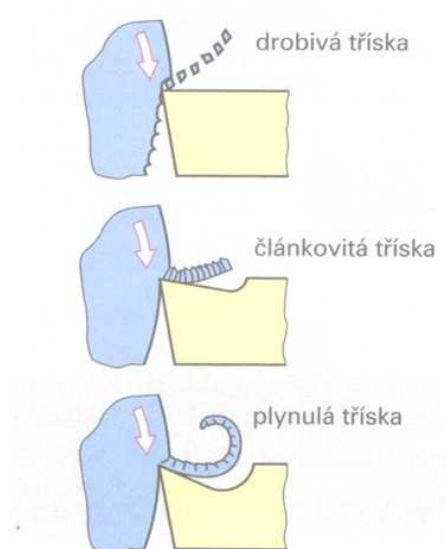


Obrázek 18. Tvoření třísky

### 3.4.1 Druhy třísek

Rozlišují se tři hlavní druhy třísek:

- drobivá tříska,
- článková tříska,
- plynulá tříska.



Obrázek 19. Druhy třísek

**Drobivá tříska** vzniká při soustružení křehkých materiálů, např. litiny, bronzu a tvrzené litiny. Malý úhel čela a malá řezná rychlost přispívají rovněž k tvorbě drobivé třísky. Vytrháváním materiálu z obrobku vzniká na obrobku hrubý (drsny) povrch.

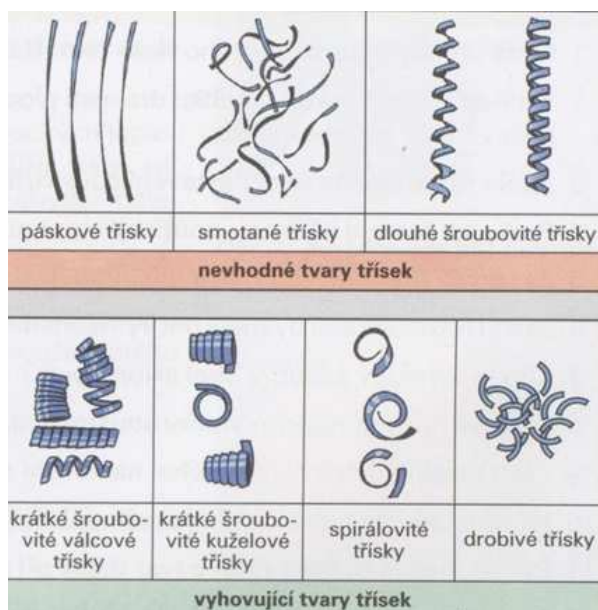
**Článková tříska** vzniká při soustružení houževnatějších materiálů, např. ocelí střední pevnosti, při středním úhlu čela a menší řezné rychlosti. Třísky se v zóně odstřihování materiálu spolu částečně svažují. Článková tříska většinou vytváří krátké šroubovice.

**Plynulá tříska** vzniká při soustružení houževnatých materiálů, a to hlavně při velkém úhlu čela a velké řezné rychlosti. Protože je při tom obrábění plynulé bez kolísání řezné síly, je obráběný povrch kvalitní (s malou hloubkou drsnosti).

### 3.4.2 Tvary třísek

Výhodného tvaru třísek je možné dosáhnout vhodnými řeznými podmínkami. Dlouhé třísky zabírají velký prostor a obtížně se odstraňují z pracovního prostoru. Překázejí při pohybu nástroje a mohou poškozovat povrch obrobku. Kromě toho představují nebezpečí úrazu pro obsluhu, zvláště při vysoké teplotě a ostrých krajích. Velmi jemné třísky zanášejí okruh řezné kapaliny a ucpávají filtry. Z hlediska odklizení jsou proto nejvýhodnější krátké šroubovitě nebo spirálové třísky.

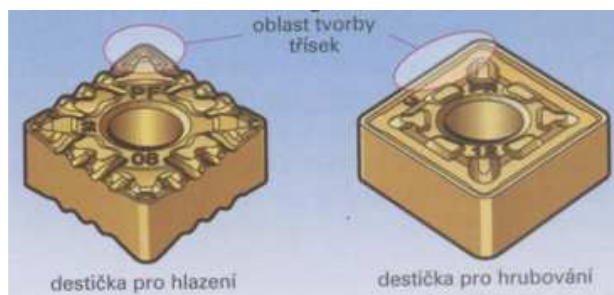
Vyšší obsah přísad ve slitinách přispívá k lámavosti třísky, např. vyšší obsah zinku v mosazi (slitiny CuZn) nebo vyšší obsah síry v automatových ocelích. Změnou geometrie nástroje lze rovněž ovlivnit délku třísek.



Obrázek 20. Tvary třísek

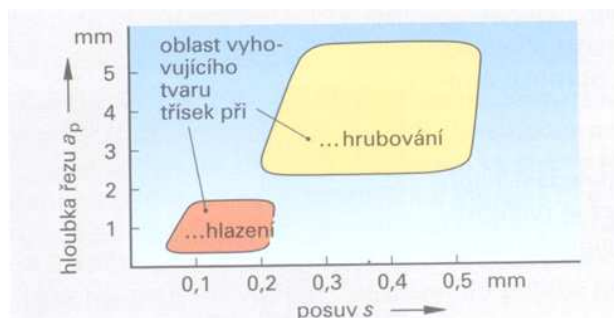
### 3.4.3 Utvářeče třísek a tvary třísek

Tvarování čela nástroje ovlivňuje tvar třísek. Diagram tvaru třísek ukazuje, při jaké kombinaci hloubky řezu (záběru) a posuvu na jednu otáčku při soustružení se tvoří třísky vhodného tvaru při použití vyměnitelných břitových destiček s **utvářečem třísky**.



Obrázek 21. Tvarování destiček pro tvorbu třísek

Břítové destičky pro hlazení vytvářejí při malé hloubce řezu a malém posuvu třísky vhodného tvaru. Břítové destičky pro hrubování jsou tvarovány tak, aby vytvářely třísky výhodného tvaru při větší hloubce a větším posuvu, tedy při větších řezných výkonech.



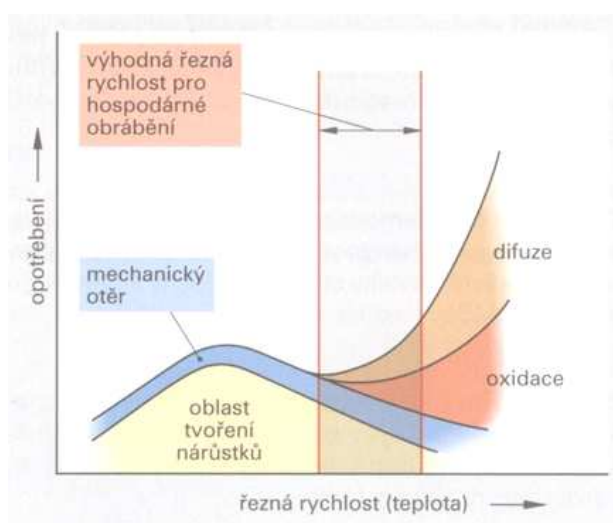
Obrázek 22. Oblasti tvoření vhodných třísek

### 3.3 Opotřebení a trvanlivost

Trvanlivostí nástroje se označuje doba provozu, po kterou se udrží opotřebení nástroje v příslušných mezích. Konec trvanlivosti nástroje pro hlazení je možné poznat podle vad obrobeného povrchu a podle odchylek požadovaných rozměrů. Konec nástroje pro hrubování lze poznat podle opotřebení jeho břitu.

#### 3.3.1 Příčiny opotřebení

Opotřebení nástroje je způsobeno hlavně tlakem a třením materiálu při současném snížení pevnosti nástroje zvýšenou teplotou, oxidací a difúzí. Při nižších řezných rychlostech a tedy i nižších teplotách přispívá k opotřebení nástroje vznik nárůstku a při vyšších řezných rychlostech a tedy vyšších teplotách přispívá k opotřebení více oxidace a difuze.



Obrázek 23. Příčiny opotřebení

**Nárůstek** se tvoří při obrábění oceli břitovými destičkami ze slinutých karbidů při příliš nízké řezné rychlosti navařováním drobných částí obráběného materiálu na čelní (a někdy i na hřebetní) plochu nástroje. Nárůstek mění geometrii břitu, zvětšuje řeznou sílu (odpor) a tím i namáhání nástroje. Při odlamování větších nárůstků dochází k vylamování břitu nástroje a tím jeho opotřebení.



Obrázek 24. Vytváření nárůstku na ostří



Tvoření nárůstků je možné omezit nebo snížit:

- zvýšením řezné rychlosti,
- použitím povlakovaných destiček, které se s ocelí nesvařují,
- hladký povrch čela nástroje, docílený např. lapováním,
- zvýšením přívodu řezné kapaliny.

**Otěr** pohybujícím se obrobkem na hřbetu a odváděnými třískami na čele nástroje způsobuje mechanické opotřebení odběrem materiálu nástroje, které není příliš závislé na teplotě

**Oxidace** nástroje při vysokých teplotách způsobených třením vede k hrubnutí a vylamování nástroje v okolí břitu.

**Difuze** atomů mezi obrobkem a nástrojem nastává při vysokých teplotách v případech, kdy mají materiály podobnou strukturu, např. při obrábění oceli nástrojem HSS nebo SK. Difuze vede k úbytku materiálu z čelní plochy nástroje.

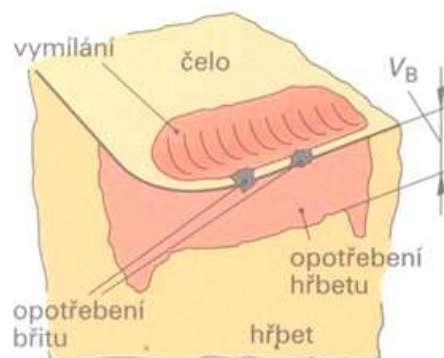
Povlakované nástroje, resp. Břitové destičky jsou mnohem odolnější proti tvoření nárůstků, proti mechanickému otěru i proti oxidaci a difuzi. Napařená vrstva (povlak) dává nástroji z houževnatého materiálu velkou povrchovou tvrdost a otěruvzdornost.



Obrázek 25. Povlakovaný břit nástroje

### 3.3.2 Druhy opotřebení

Opotřebení způsobená zmíněnými vlivy mají ve svém výsledku různé geometrické podoby.



Obrázek 26. Druhy opotřebení nástroje

U **opotřebení hřbetu nástroje** otěrem se hodnotí jeho šířka  $V_B$ . Opotřebení hřbetu ovlivňuje přesnost obrobenej plochy a její kvalitu (drsnot) a zvětšuje řezný odpor a tím i pracovní teplotu.



Obrázek 27. Opotřebení hřbetu nástroje

**Vymílání** je způsobené difuzí a mechanickým otěrem třísek. V čelní ploše vyhloubí odváděné třísky žlábek za břitem. Oslabí se tím pevnost břitu a zvýší se nebezpečí vylamování hrany ostří. Vymletý žlábek způsobuje větší deformaci odváděných třísek a tím větší řezný odpor.



Obrázek 28. Vymílání nástroje

**Opotřebení a vylamování břitu** může být způsobené rázovým namáháním při přerušovaném řezu a projeví se zhoršením kvality obrobenej plochy a zvětšením řezné síly. Může vést k vylomení části břitu.



Obrázek 29. Opotřebení břitu nástroje

**Zlomení břitu** může být způsobené u křehkého materiálu břitové destičky při nepřiměřeném namáhání. Není-li opotřebená destička zavčas vyměněna, může dojít ke zlomení břitu.



Obrázek 30. Vylomení břitu nástroje

K posouzení a optimalizaci by mělo být opotřebení nástrojů pravidelně kontrolováno lupou nebo mikroskopem. Běžné opotřebení nástroje je normální, je však třeba zabráňovat zlomení a podobným vážným závadám. Při nadměrném opotřebení nástroje je třeba přijmout opatření, která opotřebení zmenší nebo zcela odstraní.

Tabulka 7. Opatření při nadměrném opotřebení soustružnického nástroje

Velké opotřebení hřbetu	Velké vymílání čela	Vylamování břitu	Ulomení břitu	Opatření k nápravě (K posouzení účinnosti je třeba opatření vyzkoušet.)
		*		Zvýšení řezné rychlosti
*	*			Zmenšení řezné rychlosti
*		*		Zvětšení posuvu
			*	Zmenšení posuvu
			*	Zmenšení hloubky řezu
*	*			Použití otěruvzdornějšího řezného materiálu
		*	*	Použití houževnatějšího řezného materiálu
*	*			Použití povlakovaného nástroje
	*	*		Zvětšení úhlu čela
			*	Zvětšení úhlu a poloměru špičky
*	*			Zvětšení přívodu řezné kapaliny

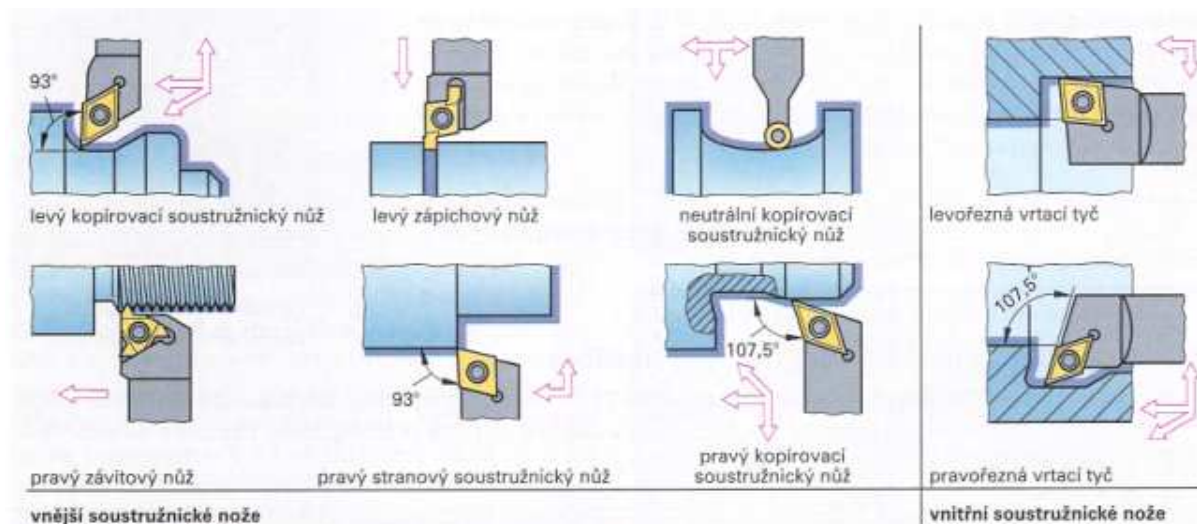
### 3.4 Soustružnické nástroje

Dnešní soustružnické nástroje se skládají z držáku a břitové destičky. Břitová destička je upnuta nebo přišroubována v tvarovaném lůžku držáku. Používají se také soustružnické nože s připájenými břitovými destičkami a nože celé z rychlořezné oceli.

#### 3.4.1 Volba držáku a vyměnitelné břitové destičky

Podle tvaru nože resp. polohy úchyty břitové destičky na držáku rozlišujeme vnější a vnitřní soustružnické nože. Kvůli tuhosti a stabilitě nože musí být držák, pokud možno, hodně masivní. Hlavním kritériem volby je však požadovaný tvar obrobené plochy a tím i tvar destičky, která má být na držáku upnuta.

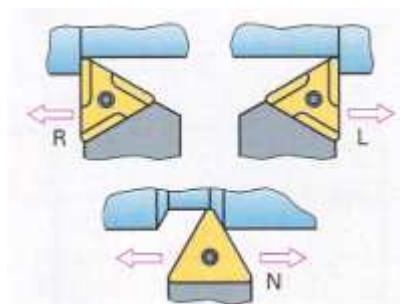




Obrázek 31. Soustružnické nože pro různé práce

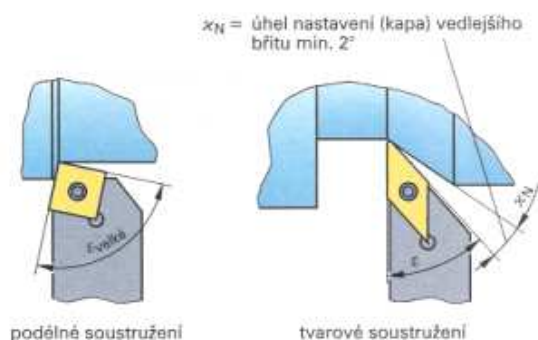
### 3.4.2 Tvar a velikost vyměnitelných břitových destiček

Podle polohy hlavního břitu, resp. směru řezání vzhledem k držáku rozlišujeme pravý (pravořezný) nůž (R), levý nůž (L) a neutrální nůž (N).

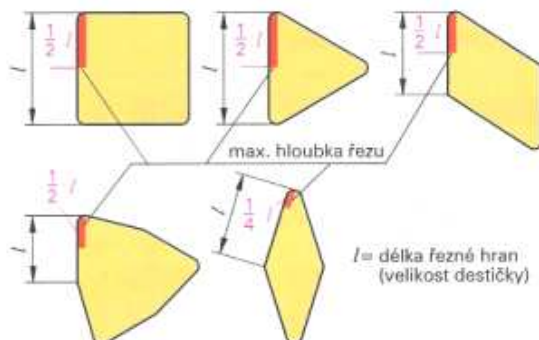


Obrázek 32. Orientace soustružnického nože

**Úhel špičky** by měl být z důvodu pevnosti břitu co největší. Nůž s malým úhlem špičky je však univerzálnější a používá se k soustružení složitých tvarů a k hlazení. Pro hrubování je třeba volit takovou velikost destičky, aby při požadované hloubce řezu nebyla překročena hloubka záběru povolená pro každý typ destičky odlišně.



Obrázek 33. Volba úhlu špičky



Obrázek 34. Maximální hloubka záběru

### 3.4.3 Upínání vyměnitelných břitových destiček

K upevnění vyměnitelných břitových destiček v držáku se používají různé způsoby upínání.

**Pákové upínání destiček s otvorem** vtlačuje vyměnitelnou destičku do přesně tvarovaného lůžka, a to s velkou polohovou přesností. Při výměně destičky není volný žádný upínací díl, protože zapuštěný stavěcí šroub páky zůstává stále v držáku. Pokud je to možné, je nejlépe zvolit tento systém.

**Šroubové upínání destiček s otvorem** se zvláště hodí pro držáky, ve kterých je kvůli potřebnému tvaru nože málo místa pro upínací systém. Otvor ve výměnné destičce pro zapuštěnou hlavu šroubu je umístěn tak, aby byla při utahování destička vtlačena do svého lůžka i v bočním směru a nemohla se pak potočit.

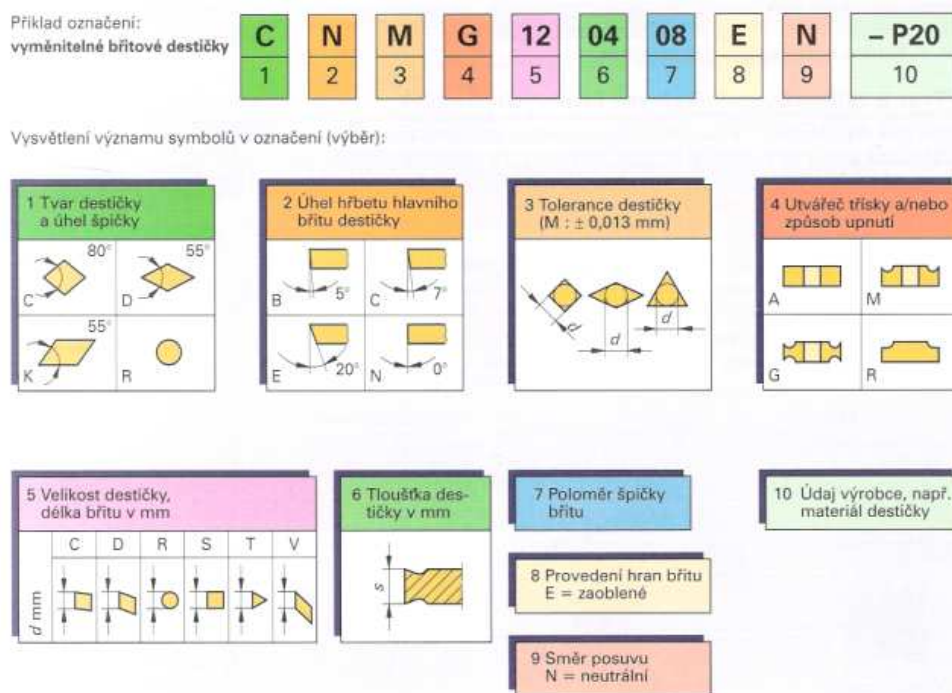
**Upínání destiček bez otvoru** přitlačnou příložnou (přítlačným palcem) se hodí pro obrábění malými řeznými silami (rozhodně ne pro hrubování), které neuvolní destičku z upnuté polohy.



Obrázek 35. Upínání vyměnitelných soustružnických destiček

### 3.4.4 Označování vyměnitelných břitových destiček

Vyměnitelné břitové destičky se označují podle ČSN 22 09 05 alfanumerickou značkou obsahující 10 údajů, z nichž prvních 7 je povinných. Údaje 8 a 9 se uvádějí v případě potřeby. Údaj 10 obsahuje informaci podle údajů výrobce.



Obrázek 36. Označování vyměnitelných břitových destiček

### 3.5 Upínání nástrojů a obrobků

#### 3.5.1 Upínání soustružnických nástrojů

Soustružnický nůž musí být upevněn pokud možno nakrátko (blízko ostří) a pevně, aby se neohýbal a nekmital. Břit musí nastaven na střed, tj. musí ležet během příčného posuvu stále v jedné rovině s osou soustružení. Při nedodržení této podmínky (chybné výškové nastavení nože v upínači) se při příčném posuvu mění úhel čela i úhel hřbetu, tedy řezné podmínky. Při nastavení nad střed se zmenší úhel hřbetu a nůž tlačí hřbetem na obrobek. Při nastavení pod hřbet se zmenší úhel čela a při upichování zůstane stopka a nedojde k oddělení. Pro zkrácení prostožů soustruhu se přesné nastavení v univerzálním držáku provádí mimo soustruh.



Obrázek 37. Chybné výškové nastavení nástroje při příčném soustružení

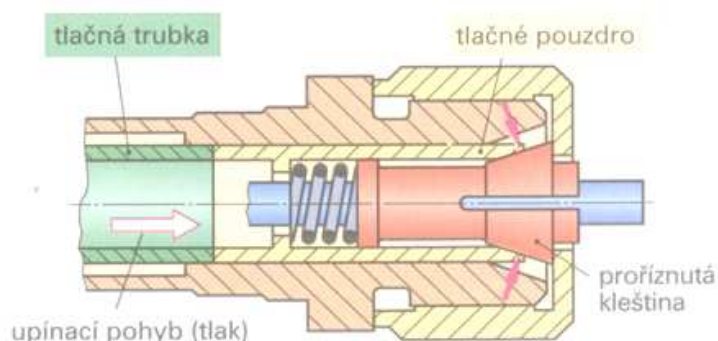
#### 3.5.1 Upínání obrobku

Obrobek musí být upnutý bezpečně (pevně), jednoduše, přesně v ose (polohou i sklonem) a bez deformace tvaru.

### Kleštinové upínače

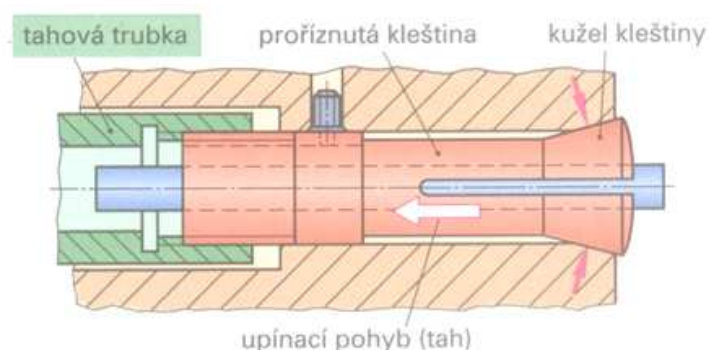
Kleštinový upínač nemá velké upínací rozpětí jako čelistová sklíčidla, ale je určen k upínání tyčového materiálu určitého průměru. Upínací síly jsou rozloženy na vnější ploše materiálu a nedochází k jeho deformaci. Kleštinové upínače jsou vhodné pro soustružení při vysokých otáčkách a pro sériovou výrobu. Základem kleštinových upínačů je podélně proříznuté trubkové pouzdro s kuželovitě rozšířeným vnějším průměrem na proříznutém konci. Vtahováním kuželovitého konce do válcového otvoru se proříznutý konec svírá kolem materiálu. Kompletní kleštinový upínač se ovládá axiálním pohybem tahové trubky v ose upínače.

**Tlačná trubka** upíná (při pohybu) dopředu. Tyto upínače se umožňují rychlou a snadnou výměnu tzv. tlačných kleštin pomocí bajonetového uzávěru upínače, který se sejme po pootočení o 90°. Materiál se upínáním neposune.



Obrázek 38. Tlakový kleštinový upínač

**Tahová trubka** upíná (při pohybu) dozadu. Přesnost upínání je srovnatelná s upínáním dopředu. Výhodou však je, že při upínání přírubových výrobků se opře polotovar o vřeteno, a tím dochází k velice tuhému upnutí. Tažná kleština se při upnutí posune i s materiálem dozadu a je třeba s tím počítat. Tažná kleština je zašroubovaná v tahové trubce.



Obrázek 39. Tahový kleštinový upínač

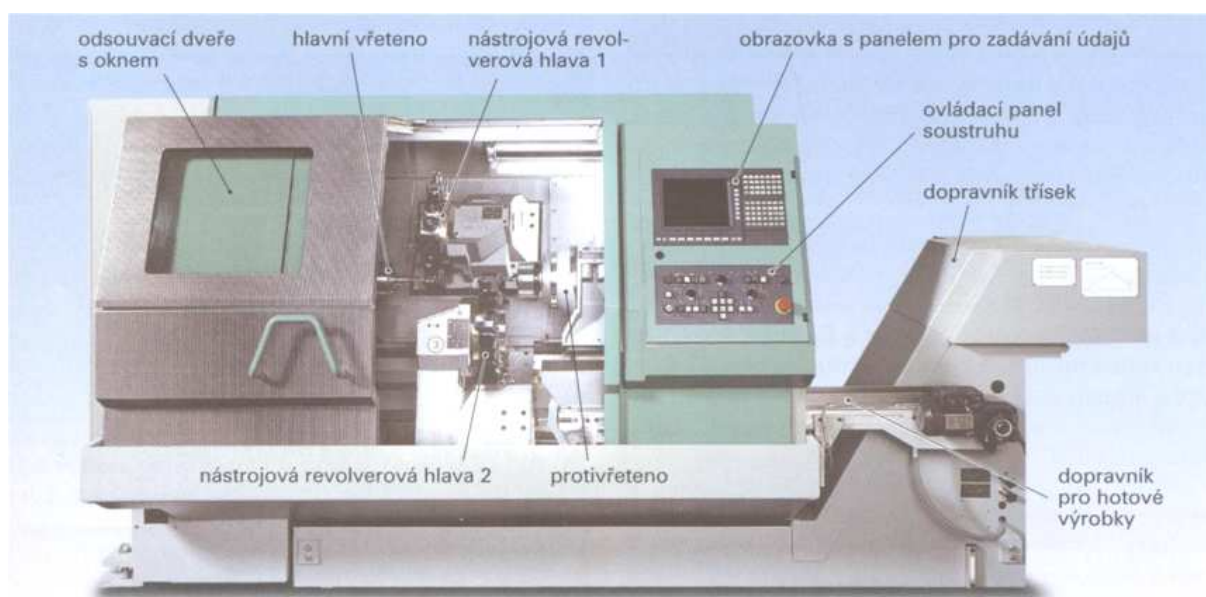


### 3.6 Soustruhy

Soustruhy se většinou dělí podle polohy roviny lože, polohy hlavního vřeten a podle počtu vřeten. K důležitým vlastnostem a parametrům patří průchodnost vřeten, maximální točný průměr a maximální točná délka, výkon pohonu, maximální otáčky vřeten a počet nosičů nástrojů s počty pozic pro nástroje.

#### CNC soustruhy

Pro tovární výrobu se používají převážně číslicově řízené (NC) soustruhy. Při řízení počítačem mluvíme o CNC řízení. Jednoduchý soustruh (bez klik a pák ručního ovládání) má pracovní vřeteno a revolverovou nástrojovou hlavu, řízenou v podélném i příčném pohybu (v osách X a Z). Soustruh je většinou možné dovybavit další revolverovou hlavou z druhé strany nebo nástrojovou hlavou s pohonem pro frézování nebo vrtání.



Obrázek 40. CNC soustruh

#### Doplňkové jednotky CNC soustruhů

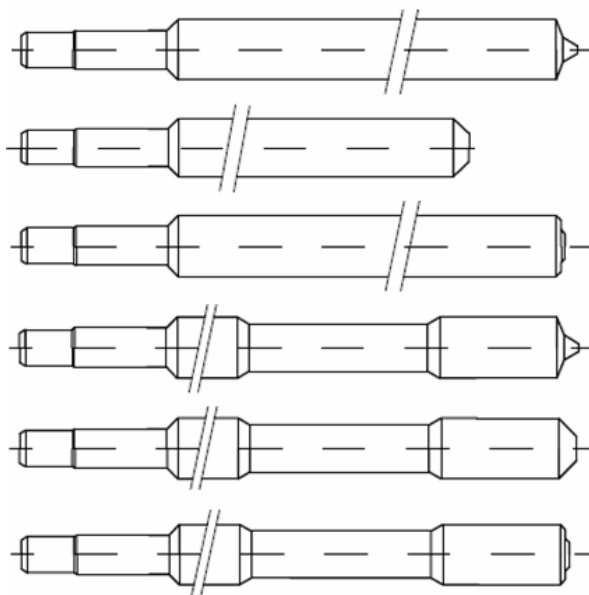
Protivřeteno, poháněné synchronně s pracovním vřetenem, může sloužit k upnutí obrobku z druhé strany. Při upíchnutí pak nezůstane na žádné z oddělených částí stopka. Dva upnuté výrobky pak mohou být současně obráběny dvěma nástroji upnutými nezávisle ve dvou nástrojových hlavách. Přesné natočení a zabrzdění pracovního vřeten umožňuje při řízení pohybu nástrojové hlavy ve třech osách (X, Y, Z) provádět na rotačně opracovaném polotovaru frézovací a příčné vrtací operace jako při pevném upnutí obrobku na stole frézky.

## 4 DÍLEC VENTILKOLBEN CRI

Ventilkolben CRI je jednou ze součástí Common Rail Injection systému. Na jeho výrobu jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu povrchu, rozměrové a geometrické přesnosti.

### 4.1 Dílce ventilkolben CRI všeobecně

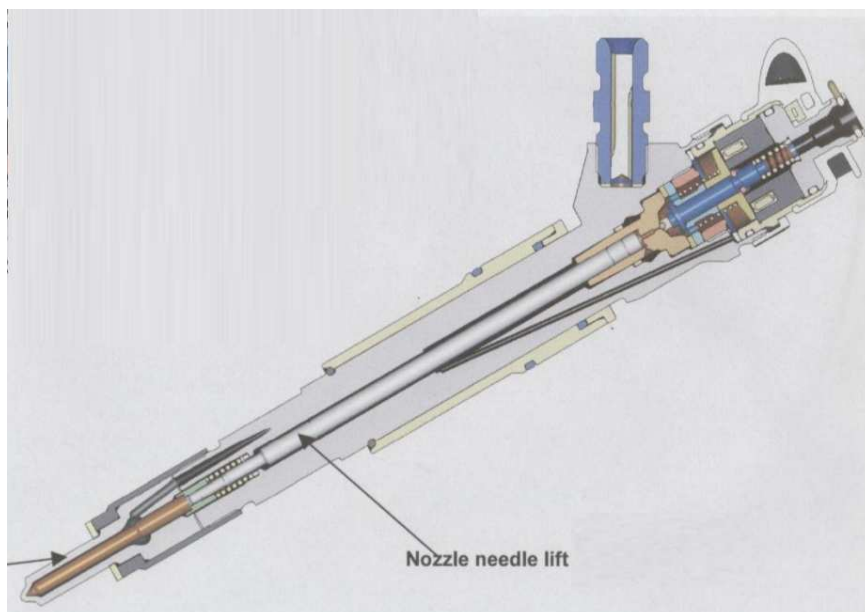
Ventilkolben je vyráběn firmou Mesa Parts v objemu několika desítek milionů kusů ročně. Proto je optimalizace jeho výroby a hledání řešení problémů při jeho výrobě jedním ze základních zájmů firmy. Je vyráběn ve značných modifikacích, co se týká délek, tvarů zakončení nebo se jedná o dílce se zápichem či bez něho. Má však jednu část, která je společná pro všechny. Tato část je označována jako „DGV“. Jedná se o přední část dílce v podobě dvou soustružených průměrů. Této skutečnosti bude využito při řešení této diplomové práce a vše bude vztahováno právě k části DGV.



Obrázek 41. Modifikace dílce ventilkolben CRI

#### 4.1.1 Použití

Ventilkolben je část dieselového injektoru, který u CRI systému reguluje přívod motorového paliva do válce. Přenáší posuv elektronicky regulovaného magnetického ventilu na jehlu trysky. Mechanismus při zpětném pohybu otevírá cestu palivu přes vstřikovací trysku do válce.



Obrázek 42. Řez vstřikovací jednotkou CRI [15]

#### 4.1.3 Kritické ukazatele

Mezi hlavní ukazatele, u kterých je kladen velký důraz na kvalitu patří:

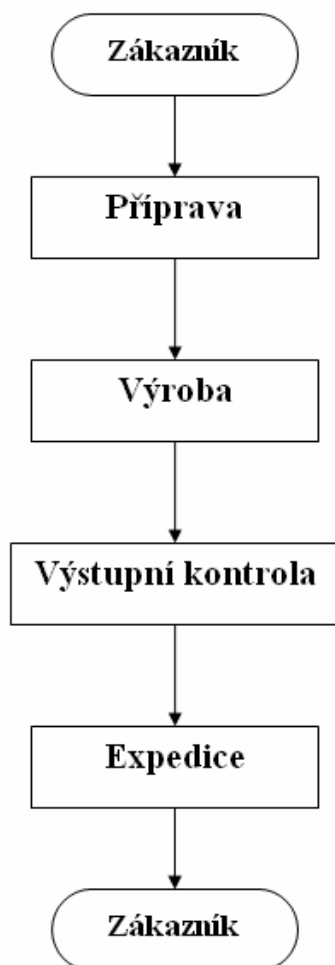
- házivost a koaxialita (souosost) vodícího průměru ke špičce pístu,
- velmi hladký povrch bez ostřin,
- přesné rozměry soustružených válcových ploch,
- nežádoucí je kuželovitost válcových ploch.

## 4.2 Identifikace procesu výroby dílce ventilkolben

Výroba dílce typu ventilkolben je realizována v několika procesech. Jedná se o dlouhodobě kontinuální výrobu, proto jsou vývojové diagramy zjednodušeny a ukazují pouze základní informace toku dílců výrobou. Subproces soustružení je následně rozebrán do jednotlivých činností.

### 4.2.1 Procesní mapa

Zákazníkem je zde myšlena Mesa Parts Lenzkirch, přes kterou je realizován veškerý marketing společnosti. Dílce vyrobené ve Vysokově ve čtyřech procesech se expedují do Lenzkirchu. Mesa Parts Lenzkirch zajišťuje kalení a broušení dílců před dodáním externímu zákazníkovi.



Obrázek 43. Schéma procesní mapy



#### 4.2.2 Příprava

V přípravě výroby jsou zdokumentovány všechny požadavky. Objednávka je posouzena a jsou naplánovány počty a typy strojů, které budou danou zakázku realizovat. Dále je naplánováno jak dlouho budou muset stroje vyrábět, než bude zakázka ukončena.



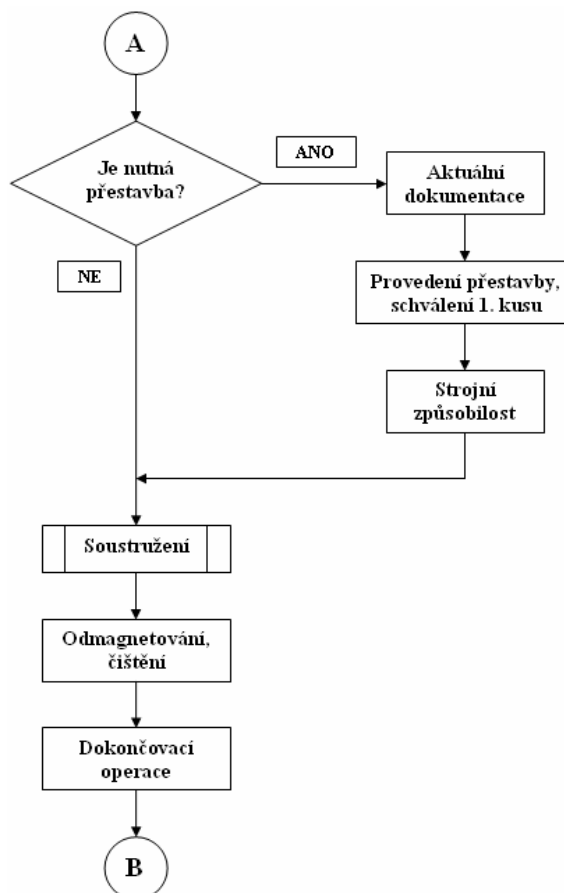
Obrázek 44. Schéma procesu přípravy

#### 4.2.3 Výroba

V případě nutnosti přestavby stroje na jiný typ dílce se vystaví aktuální dokumentace, provede se přestavba a schválení prvního kusu. Pokud přestavba stroje nutná není pokračuje se ve výrobě beze změn. Výroba obsahuje subprocesy soustružení, následně odmagnetování a čištění. Celý proces výroby končí dokončovými pracemi (odostření, kontrola vybraných rozměrů, vizuální kontrola).

Činnosti obsluhy strojů při soustružení:

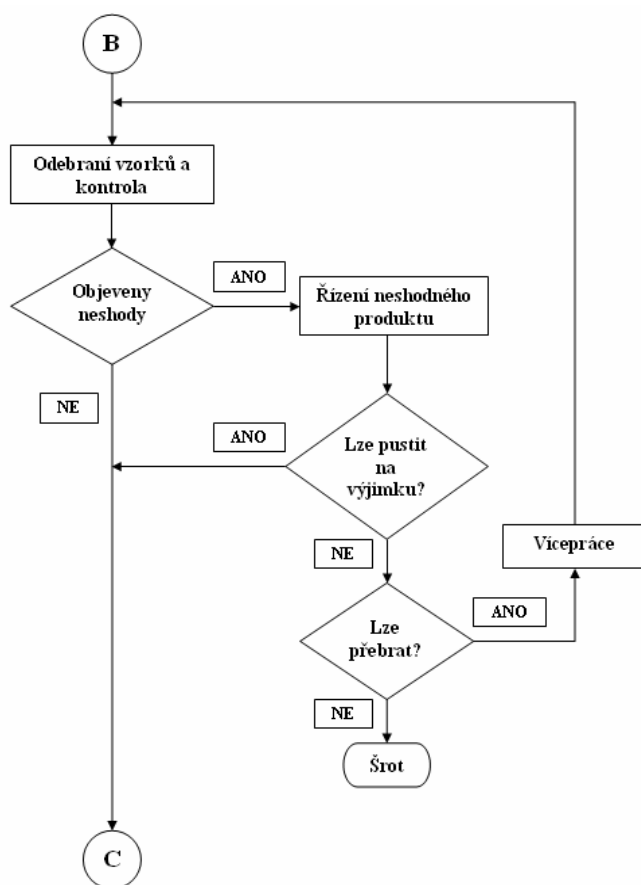
- rozjetí stroje popř. převzetí stroje od předešlé směny,
- měření dle SPC, kontrolní měření všech rozměrů na dílci, vizuální kontrola dílce,
- kontrola brousícího plánu, výměna nástrojů,
- mazání stroje, doplnění řezných kapalin, čištění filtrů,
- doplnění materiálu do zásobníku,
- předání stroje další směně, popř. vypnutí stroje, úklid.



Obrázek 45. Schéma procesu výroby

#### 4.2.4 Výstupní kontrola

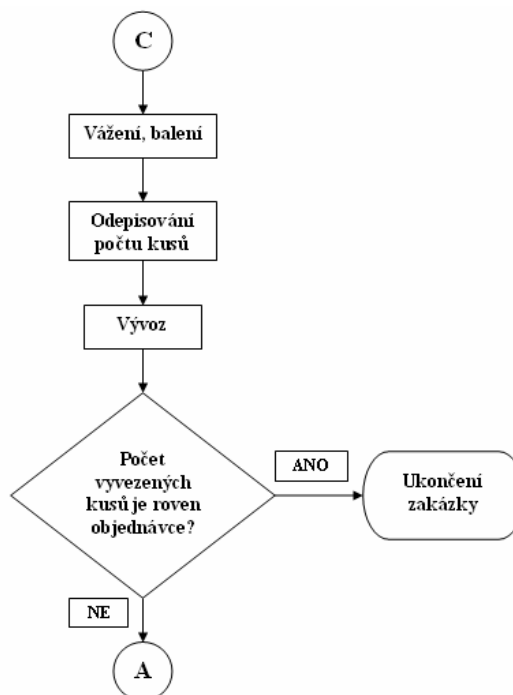
Odebrání vzorků dle kontrolního plánu výstupní kontroly. Pokud jsou objeveny neshody následuje řízení neshodného produktu. V případě výjimky nebo po přebrání se vrací dílce do produkce. V opačném případě se dílce šrotují.



Obrázek 46. Schéma procesu výstupní kontroly

#### 4.2.5 Expedice

Proces expedice uzavírá procesy ve firmě. Je v něm zahrnuto vážení, balení, odepisování počtu kusů v systému a samotný vývoz. Pokud počet kusů odpovídá objednávce, je zakázka ukončena, pokud ne, pokračuje se ve výrobě.



Obrázek 47. Schéma procesu expedice



Tabulka 8. Technické možnosti strojů

Stroj	Tornos DECO Basic	GLD 20
Průchod vřetene	16 mm	20 mm
Max. otáčky	12 000 min <sup>-1</sup>	8000 min <sup>-1</sup>
Max. vysunutí na jedno upnutí	160 mm	195 mm

## Řezné podmínky při soustružení DGV

Tabulka 9. Řezné podmínky u vybraných strojů

Stroj	Tornos Basic	GLD 20
Otáčky	5000 min <sup>-1</sup>	5000 min <sup>-1</sup>
Posuv s	0,035 ot <sup>-1</sup>	0,05 ot <sup>-1</sup>

Další podmínky při soustružení DGV jsou u obou strojů totožné:

- hloubka řezu  $a_p$  je proměnná v rozmezí od 0,8125 do 0,9625 mm,
- chlazení řezným olejem s minerální přísadou pomocí vysokotlaku,
- upnutí obrobku pomocí tahového kleštinového upínače,
- šroubové upnutí řezné destičky s otvorem,
- Interval výměny řezné destičky 1000 ks.

Charakteristika nástroje je z důvodu požadavků firmy na ochranu know-how obecná a neúplná. V dalších částech práce se jedná zejména o porovnávání opotřebení a mikrostruktury jednotlivých vzorků. Pro toto hodnocení nejsou údaje nikterak podstatné.

Tabulka 10. Charakteristika nástroje

Úhel hřbetu $\alpha$	7°
Úhel břitu $\beta$	-
Úhel čela $\gamma$	pozitivní
Úhel ostří $+\lambda$	pozitivní
Úhel nastavení $\kappa$	93°
Poloměr špičky $r_\epsilon$	0,2 mm
Úhel špičky $\epsilon$	55°
Složení	W <sub>2</sub> C + Co
Velikost zrna	-
Povlak	Ano

## 4.4 Problémy při soustružení

Při obrábění vzniká několik problémů, které se následně projevují na kvalitě produkce. Problémy jsou způsobeny hlavně materiálem, který má zhoršenou obrobiteľnost ve stavu žíhaném na měkko. Mezi hlavní vady, které se objevují na dílcích ventilkolben patří:

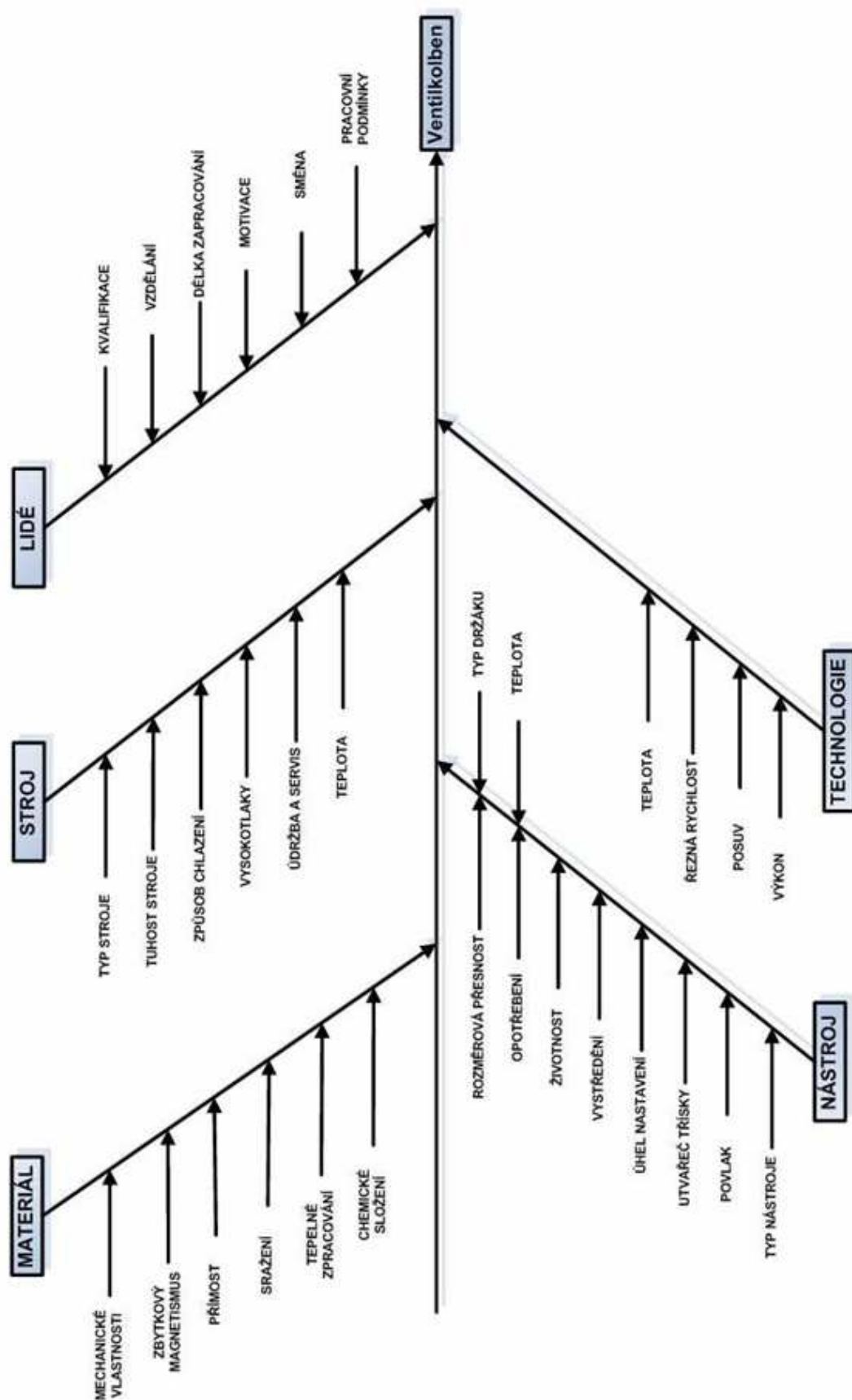
- nežádoucí povrch na obráběných plochách ,
- nedodržení rozměrové přesnosti,
- kuželovitost u DGV,
- nedodržení délek,
- nedodržení tvaru,
- poloha mimo toleranci,
- ostřiny na výběhu z úhlů,
- dlouhé plynulé třísky o délce až 20 cm.

### 4.4.1 Zmetkovitost

V dnešní době je interní zmetkovitost dílce ventilkolben 1,5 až 2 %, pokud jsou do šrotovaných dílců zahrnovány i dílce sloužící k seřízení strojů. Pokud se jedná pouze o nekvalitu ve výrobě, pohybují se hodnoty zmetkovitosti okolo 1 %. Vyskytují se však výjimky, při kterých v krátkém období zmetkovitost skokově vzroste. Odhalení některých příčin je zjevné, ale někdy je klasický pohled poněkud zavádějící. Proto bude v této práci proveden plánovaný experiment (DOE), pomocí kterého budou objasněny vlivy zkoumaných faktorů na subprocess soustružení.

### 4.4.2 Možné příčiny zmetkovitosti

Na subprocess soustružení působí velké množství faktorů. Po poradě s vedením, zástupci oddělení výroby a kvality byly vytipovány faktory, které ovlivňují výrobu dílce ventilkolben a byly zakresleny do Ishikawova diagramu viz obrázek 51.



Obrázek 52. Ishikavův diagram

## 5 PLÁNOVANÝ EXPERIMENT (DOE)

Hlavním cílem navrhování experimentů je pomoc při stanovení optimální úrovně a tolerance pro klíčové funkční parametry výrobku či služby a pro ovlivňující technologické faktory, které zaručí vyhovující a stabilní plnění funkce při používání. V podstatě je nutno k inovacím a zlepšování výrobků, služeb a procesů navrhovat a uskutečnit řadu pokusů, prováděných při různých kombinacích úrovní ovlivňujících faktorů, k ověření významnosti vlivu změn uvažovaných faktorů. Takové pokusy se provádějí v každodenní praxi většinou bez hlubšího uvážení a téměř vždy bez náležitého vyhodnocení a interpretace výsledků. V důsledku toho se často dělají vážné chyby při rozhodování o účelných konstrukčních a technologických změnách. [4]

### 5.1 Příprava plánovaného experimentu

Celý experiment byl vztahován k DGV tj. veškeré odezvy se budou týkat právě tohoto rozměru. Důvodem této volby je:

- shodnost DGV u všech dílců – použitelnost výsledků pro všechny typy dílce,
- vyšší četnost vad vyskytujících se na této části,
- na DGV jsou kladeny největší nároky na drsnost povrchu z celého dílce.

#### 5.1.1 Faktory

Po poradě s vedením byly vytipovány faktory, u kterých se předpokládá velký vliv na subprocess soustružení. Tyto faktory byly pojmenovány jako:

**Pracoviště** – dvouúrovňový faktor s úrovněmi **Pracoviště 64** a **Pracoviště 72**,

**Doba** – dvouúrovňový faktor s úrovněmi **Před** a **Po** výměně nástroje,

**Šarže** – čtyřúrovňový blokový faktor úrovně **1, 2, 3, 4**.

#### **Pracoviště**

Jedná se o dva stroje CNC označená čísla 64 a 72. Důvodem volby tohoto faktoru bylo, že oba stroje vyrábějí dlouhodobě dílec ventilkolben a při výrobě se používá stejná technologie, která se liší pouze velikostí posuvu.

#### **Doba**

Standardní doba výměny nože, který soustruží DGV je 1000 ks. Jako úroveň byla zvolena doba, ve které se právě nachází nástroj, jestli je těsně po výměně nebo těsně před ní, tj. na konci stanovené životnosti.

#### **Šarže**

Jednotlivé šarže materiálu jsou podle vedení a obsluhy zdrojem velkých problémů při obrábění. Experiment proběhl ve čtyřech blocích tj. na čtyřech šaržích materiálu.

#### 5.1.2 Odezvy

Po poradě s vedením bylo rozhodnuto, že jako sledované odezvy budou hodnoty hloubky drsnosti povrchu a indexu strojní způsobilosti. Tyto hodnoty vypovídají o stavu procesu a přímo souvisejí s životností a opotřebením nástroje. Dále bude



měřeno opotřebení hřbetu nástroje, aby se zjistilo jak velké rozdíly se mezi opotřebením vyskytují.

### **Strojní způsobilost**

Strojní způsobilost bude vyhodnocena z padesáti měření na dílcích vyrobených po sobě. Bude měřen větší průměr DGV tj. průměr  $2,925 \pm 0,025$  mm.

### **Drsnost povrchu**

Drsnost povrchu byla volena proto, že je zákazníkem požadována maximální hloubka drsnosti  $R_{\max} = 10$   $\mu\text{m}$ . Bude měřena hloubka drsnosti na větším průměru DGV  $2,925 \pm 0,025$  mm.

### **Opotřebení břitů**

Opotřebení  $VB_{\max}$  bude měřeno na hřbetu nástroje za pomoci měřicího mikroskopu. Měření proběhne na dvou opotřebených břitech destičky.

## **5.1.3 Pokyny pro obsluhu strojů**

Experiment probíhal jeden měsíc na čtyřech šaržích dodávaného materiálu. Úkolem obsluhy strojů pro každou šarži materiálu a pro každý stroj bylo:

- změřit 50 ks po sobě vyrobených dílců před a po výměně nástroje a vystavit protokol strojní způsobilosti,
- odebrat 3 ks po sobě vyrobených dílců a uschovat je spolu s protokoly strojní způsobilosti,
- uschovat 5 ks konců z materiálu pro další analýzu,
- po opotřebení obou břitů destičky (po 1000 vyrobených kusech), destičku přiložit k protokolům strojní způsobilosti, dílcům a koncům tyčí,
- vše řádně označit číslem stroje, číslem šarže a datem.

## **5.2 Měření odezev**

### **5.2.1 Měření indexu strojní způsobilosti**

Hodnota indexu strojní způsobilost byla měřena obsluhou jednotlivých strojů z 50 ks po sobě jdoucích dílců. K měření průměrů byly použity mikrometry. Ukázka protokolu strojní způsobilosti je v příloze 1. Hodnota indexu strojní způsobilosti byla volena proto, že je nezávislá na vystředění procesu. Hodnota kritického indexu strojní způsobilosti  $c_{mk}$  by mohla být z hlediska tohoto experimentu zavádějící, protože nelze očekávat na počátku a na konci životnosti nástroje stejné vystředění měřeného souboru dat. Strojní způsobilost poskytuje relevantní informace o stavu stroje. Hodnoty indexu strojní způsobilosti  $c_m$  jsou uvedeny v tabulce 11. Výpočet indexu strojní způsobilosti je shodný s výpočtem indexu procesní způsobilosti s tím rozdílem, že hodnoty jsou měřeny na dílcích vyrobených a odebíraných po sobě a ne odebíraných určitých časových intervalech. Požadovaná hodnota je vyšší nebo rovna 1,33.

Výpočet  $c_m$ :

$$c_m = \frac{U - L}{6s} \geq 1,33 \quad (2)$$

Výpočet směrodatné odchylky:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (3)$$

- $n$  počet měření  
 $U$  horní toleranční mez (v tomto případě 2,95)  
 $L$  dolní toleranční mez (v tomto případě 2,90)  
 $\bar{x}$  aritmetický průměr  
 $x_i$  i-tá hodnota měření



Obrázek 53. Digitální mikrometr

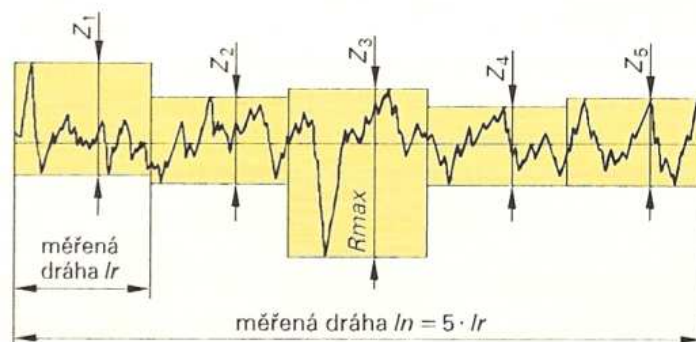
Tabulka 11. Model DOE pro hodnoty strojní způsobilosti  $c_m$

Šarže A_1				Šarže A_2				Šarže A_3				Šarže A_4			
Pracoviště 64		Pracoviště 72		Pracoviště 64		Pracoviště 72		Pracoviště 64		Pracoviště 72		Pracoviště 64		Pracoviště 72	
Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po
2,50	2,67	4,67	2,71	2,10	2,14	3,22	3,37	5,84	5,53	3,97	2,95	3,72	3,41	3,67	2,67

### 5.2.2 Měření hloubky drsnosti povrchu

Drsnosti je třeba měřit na kritických místech povrchu s největší drsností. Při pravidelně (periodicky zdrsněném povrchu v jednom směru, jako např. po soustružení, musí být profil měřen kolmo na směr rýh. [1]

Maximální hloubka drsnosti  $R_{\max}$  je maximální hodnota v celém profilu na obrázku 54 odpovídá  $R_{\max}$  hodnotě  $Z_3$ . [1]



Obrázek 54. Maximální hodnota drsnosti [1]

Drsnost povrchu byla měřena na drsnoměru Mahr – Perthometer. K měření drsnosti byly využity dílce, které odebrala obsluha během sběru podkladů k experimentu. Dílce byly označeny jiskřicí tužkou, aby nedošlo k jejich záměně a mohly být případně využity pro další měření. Dílce byly přidrženy v prizmátu za pomoci plastelíny.



Obrázek 55. Drsnoměr Mahr – Perthometer



Obrázek 56. Zajištění dílce v prizmátu

V tabulce je uvedena vždy maximální naměřená hodnota drsnosti ze tří měřených kusů vyrobených po sobě. Všechny naměřené hodnoty drsností jsou v příloze 2.

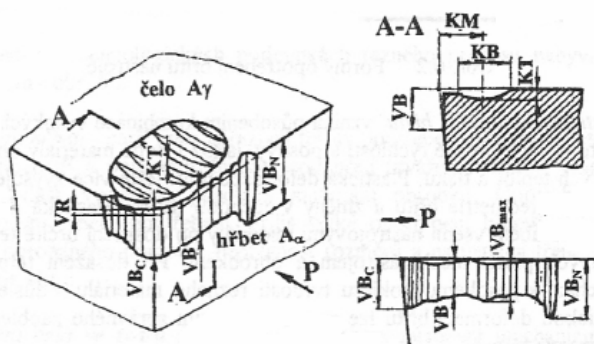
Tabulka 12. Model DOE pro maximální naměřené hodnoty drsnosti  $R_{\max}$

Šarže A_1				Šarže A_2				Šarže A_3				Šarže A_4			
Pracoviště 64		Pracoviště 72		Pracoviště 64		Pracoviště 72		Pracoviště 64		Pracoviště 72		Pracoviště 64		Pracoviště 72	
Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po
4,96	4,24	4,03	4,93	3,07	3,18	5,70	4,87	3,13	4,47	5,16	5,74	6,16	4,07	6,23	4,69

### 5.2.3 Měření opotřebení nástroje

Opotřebení hřbetu je významný parametr řezného procesu, který se kvantifikuje rozměrovými charakteristikami vztaženými k postupnému opotřebování hřbetu nástroje. [2]

Pro hodnocení problematiky opotřebení nástroje při výrobě ventilkolbenu byla vybrána charakteristika  $VB_{\max}$ , která dává hodnotnou informaci o stavu nástroje a jeho schopnosti soustružit obrobek v požadované kvalitě.



Obrázek 57. Parametry opotřebení řezného nástroje [2]

Na obrázku 58 je vidět hřbet nástroje po 1000 vyrobených kusech tj. na konci stanovené životnosti. Hodnota  $VB_{\max}$  je velmi dobře vidět, na obrázku jsou také patrné dva vruby. Jedná se tedy o opotřebení hřbetu a opotřebení ve tvaru vrubu. Všechny měřené břitové destičky vykazovaly stejné typy opotřebení. Dva viditelné vruby jsou způsobeny dvojitou hloubkou řezu  $a_p$ .



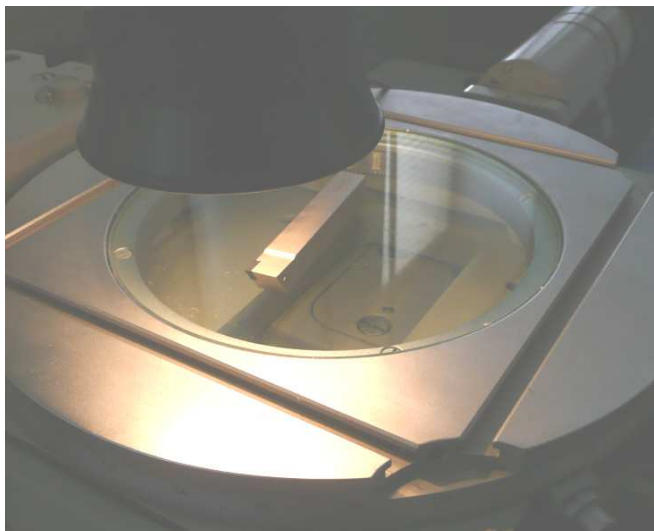
Obrázek 58. Opotřebení hřbetu nástroje po 1000 ks

**Opotřebení hřbetu**  $VB$  patří mezi abrazivní formy opotřebení. Plochy hřbetu hlavního ostří, u vedlejšího ostří a poloměru špičky, jsou před utvářením třísky, v průběhu a po utváření třísky zvlášť vystaveny materiálu obrobku. Opotřebení hřbetu je všeobecně obvyklým typem opotřebení. Příliš velké opotřebení hřbetu má za následek zhoršení jakosti obrobeného povrchu, nepřesnosti rozměrů a narůstající tření, které vzniká změnou geometrie břitu. [2]

**Opotřebení hřbetu ve tvaru vrubu**  $VB_N$  patří k typickým adhezivním opotřebením, může však stejně dobře souviset s jevem oxidačního opotřebení. Vruby vznikají v místě kontaktu břitu s bokem třísky. Toto opotřebení se omezuje přesně na toto místo, kudy proniká vzduch do oblasti obrábění. Velké opotřebení hřbetu ve tvaru vrubu ovlivňuje utváření třísky a může vést k lomu destičky. [2]



Obrázek 59. Měřicí mikroskop



Obrázek 60. Držák s měřenou destičkou

Tabulka 13. Hodnoty opotřebení hřbetu nástroje  $VB_{\max}$  [mm]

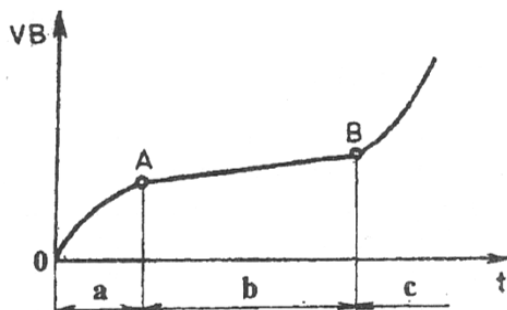
Pracoviště	64		72	
Břit	1.	2.	1.	2.
Šarže A_1	0,430	0,418	0,445	0,422
Šarže A_2	0,406	0,403	0,418	0,408
Šarže A_3	0,422	0,428	0,416	0,419
Šarže A_4	0,406	0,394	0,393	0,397

### Hodnocení

Opotřebení  $VB_{\max}$  se pohybuje v intervalu od 0,393 do 0,445 mm. Doporučení výrobce k opotřebení destiček je:

- při hlazení opotřebení do 0,2 mm,
- při hrubování do 0,8 mm.

V tomto případě se jedná o obrábění na čisto (hlazení), to nasvědčuje tomu, že opotřebení je dvojnásobně překonáno. Nicméně hodnoty drsnosti, které byly změřeny se pohybují na polovině tolerance a proto lze předpokládat možnost obrábění i více opotřebovaným nástrojem.



Obrázek 61. Charakteristický průběh  $VB = f(t)$  [2]

- a, oblast zrychleného záběhového opotřebení,
- b, oblast lineárního opotřebení,
- c, oblast zrychleného nadměrného opotřebení.

V oblasti b dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení, tzn. intenzita opotřebení je konstantní [2].

Rozdíly v opotřebení okolo 10 % nasvědčují tomu, že se opotřebení destiček pohybuje právě v oblasti b. Velikost oblasti b je nutné odhalit pro stanovení co nejdelší, ale na druhé straně i bezpečné doby do výměny břitové destičky. V oblasti c již dochází k rychlému tzv. lavinovitému opotřebení, které vede k destrukci nástroje. Této oblasti je nutné se vyvarovat a zavčas vyměnit destičku. Pro odhalení této oblasti je nutné podrobit několik destiček testům až do jejich destrukce. Při tomto testu se musí sledovat kvalita drsnosti povrchu produkovaných dílců.

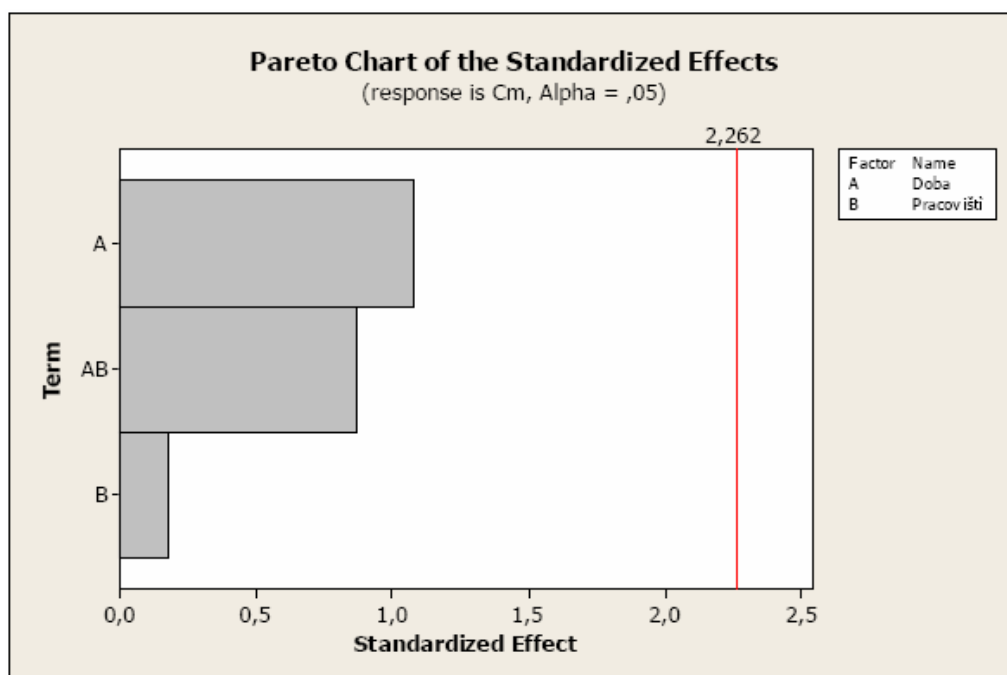
### 5.3 Vyhodnocení plánovaného experimentu

K vyhodnocení plánovaného experimentu byl použit statistický software Minitab. Z vyhodnocení by mělo vyplynout, které faktory nebo interakce mají rozhodující vliv a které tedy budou předmětem dalšího zkoumání, které úrovně rozhodujících kvantitativních faktorů vedou k optimální hodnotě odezvy a naopak, které faktory jsou prakticky bezvýznamné, takže je možno u nich zmírnit tolerance a docílit snížení nákladů. [4]

Faktory, jejichž obdélníky se v paretově diagramu dostanou za svislou červenou čáru mají vliv na odezvu. V opačném případě vliv nemají. [11]

Obdobně je tomu u  $P$  hodnot. Pokud je  $P < \alpha$  ( $\alpha = 0,05$ ), pak faktor má vliv na odezvu. Je-li  $P > \alpha$ , potom faktor nemá vliv na odezvu. [11]

#### 5.3.1 Vyhodnocení odezvy $c_m$



Obrázek 62. Paretův diagram významnosti faktorů



Žádný ze sloupců v paretově diagramu nepřekročil kritickou hodnotu významnosti pro riziko  $\alpha = 0,05$ . S tímto rizikem můžeme říci, že faktory Doba a Pracoviště nemají významný vliv na hodnotu odezvy  $c_m$ .

### Výpis dat z minitabu

Estimated Effects and Coefficients for Cm (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3,4444	0,2486	13,86	0,000
Block 1		-0,3069	0,4306	-0,71	0,494
Block 2		-0,7369	0,4306	-1,71	0,121
Block 3		1,1281	0,4306	2,62	0,028
Doba	-0,5337	-0,2669	0,2486	-1,07	0,311
Pracoviště	-0,0888	-0,0444	0,2486	-0,18	0,862
Doba*Pracoviště	-0,4313	-0,2156	0,2486	-0,87	0,408

S = 0,994399    R-Sq = 51,85%    R-Sq(adj) = 19,75%

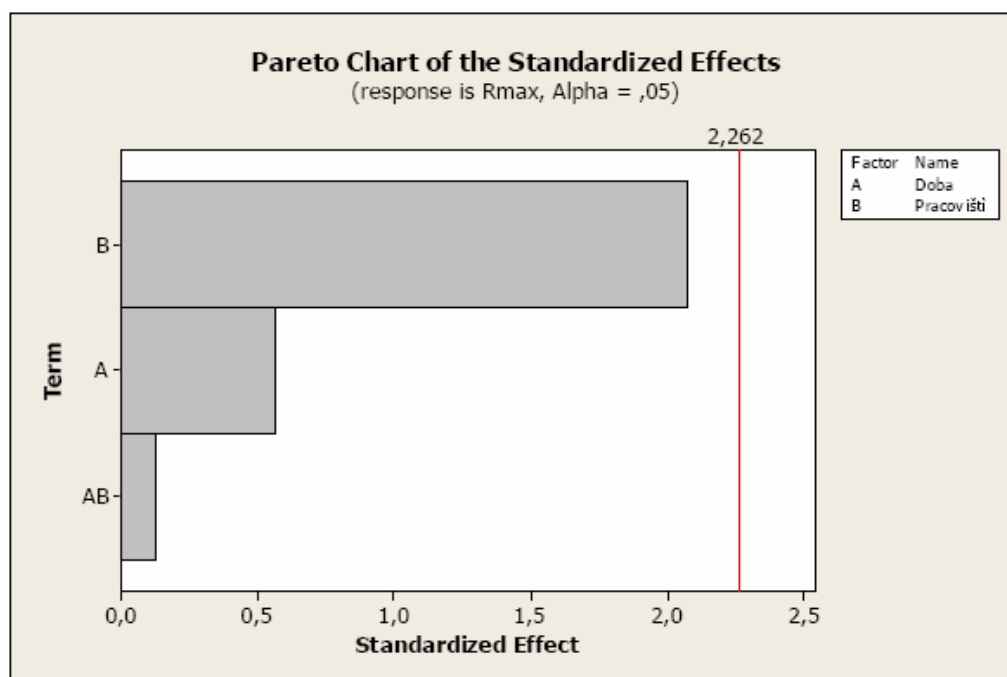
Analysis of Variance for Cm (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	3	7,6678	7,6678	2,5559	2,58	0,118
Main Effects	2	1,1711	1,1711	0,5855	0,59	0,573
2-Way Interactions	1	0,7439	0,7439	0,7439	0,75	0,408
Residual Error	9	8,8995	8,8995	0,9888		
Total	15	18,4822				

U dat lze předpokládat normální rozdělení (ověřeno normality testem). Žádný z faktorů nemá zásadní vliv na index způsobilosti  $c_m$ . U Bloku 3 je  $P$  hodnota nižší než 0,05. Ovšem celkový vliv bloků je zanedbatelný. Hodnoty v Bloku 3 u Pracoviště 64 se jeví jako podezřelé, případně extrémně odchýlené hodnoty (boxplot). Právě tyto hodnoty mohly ovlivnit  $P$  hodnotu Bloku 3.



### 5.3.2 Vyhodnocení odezvy $R_{\max}$



Obrázek 63. Paretův diagram významnosti faktorů

Žádný ze sloupců v paretově diagramu nepřekročil kritickou hodnotu významnosti pro riziko  $\alpha = 0,05$ . S tímto rizikem můžeme říci, že faktory Doba a Pracoviště nemají významný vliv na hodnotu odezvy  $R_{\max}$ .

### Výpis dat z minitabu

Estimated Effects and Coefficients for Rmax (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		4,6669	0,2445	19,08	0,000
Block 1		-0,1269	0,4236	-0,30	0,771
Block 2		-0,4569	0,4236	-1,08	0,309
Block 3		-0,0369	0,4236	-0,09	0,933
Doba	-0,2763	-0,1381	0,2445	-0,56	0,586
Pracoviště	1,0138	0,5069	0,2445	2,07	0,068
Doba*Pracoviště	0,0637	0,0319	0,2445	0,13	0,899

S = 0,978185 R-Sq = 44,40% R-Sq(adj) = 7,34%

Analysis of Variance for Rmax (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	3	2,4455	2,44547	0,81516	0,85	0,500
Main Effects	2	4,4160	4,41601	2,20801	2,31	0,155
2-Way Interactions	1	0,0163	0,01626	0,01626	0,02	0,899
Residual Error	9	8,6116	8,61161	0,95685		
Total	15	15,4893				

Vliv na drsnost je u všech zkoumaných faktorů zanedbatelný.  $P$  hodnota faktoru Pracoviště se nejvíce blíží hodnotě 0,05. Toto zjištění není nikterak překvapující, protože nastavení posuvů u obou testovaných strojů je rozdílné. Po vyhodnocení více hodnot by se mohl prokázat vliv Pracoviště na hloubku drsnosti. Vliv bloků se taktéž jako v předchozím případě neprokázal.

### 5.3.3 Diskuze výsledků

S rizikem  $\alpha = 0,05$  lze tvrdit, že vliv zkoumaných faktorů hodnoty  $c_m$  a  $R_{\max}$  jsou zanedbatelné. Nepodařilo se tedy odhalit faktory, které proces ovlivňují, ale naopak faktory, které na něj vliv nemají. Vztaheno k  $c_m$  a  $R_{\max}$ , lze dále tvrdit, že interval výměny nástrojů 1000 ks je natolik pod spodní hranicí reálné životnosti nástroje, že se neprokázal její vliv na odezvy. Ukazují to i některé naměřené hodnoty, které vykazují lepší výsledky na konci životnosti než na jejím začátku. Neprokázal se ani vliv šarží materiálu.

Blokový faktor materiál nemusel kolísat během doby, kdy se shromažďovala data. Faktory experimentu mohly být navzájem korelovány (různé obsluhy strojů během shromažďování dat), to může vést k nesprávnému dojmu o jejich účinků na odezvy.

## 6 TESTY MATERIÁLŮ

### 6.1 Obráběný materiál

Dílec ventilkolben CRI je vyráběn z nástrojové oceli S 6-5-2. Jedná se o rychlořeznou W-Mo-V ocel označovanou číslem 1.3343, dle materiálového lexikonu se jedná o ekvivalent k oceli 19 830. Materiál je dodáván v tyčích o délce 3 m a průměru 4,55 mm.

#### 6.1.1 Rychlořezné oceli všeobecně

Rychlořezné oceli se vyznačují odolností proti poklesu tvrdosti až do teplot okolo 550 °C. Jedná se o ledeburitické oceli, které jsou vysoce legované, s obsahem uhlíku nad 0,7 %. Základním legujícím prvkem v rychlořezných ocelích je wolfram, který bývá částečně nahrazen polovičním množstvím molybdenu. Typické složení rychlořezné oceli: 0,75 % C, 4,0 % Cr, 18 % W a 1 % V. V případě úsporné varianty se snižuje obsah W na 10 % a zvyšuje obsah V na 2 až 4 %. Rychlořezné oceli se kalí z teplot 1200 až 1280 °C. Popouští se na sekundární tvrdost při teplotě okolo 560 °C. Při teplotách nad 150 °C dochází k mírnému poklesu tvrdosti částečným vylučováním karbidů z martenzitu. Tím klesá tvrdost martenzitu. Při teplotách 450 až 550 °C poklesne obsah uhlíku ve zbytkovém austenitu v důsledku precipitace karbidů tak, že se zvýší Ms a austenit se transformuje na martenzit a tvrdost vzroste. Popouštění na takovou teplotu se říká popouštění na sekundární tvrdost. Při transformaci se přemění jen část austenitu a popouštění se opakuje. Pro dosažení tvrdosti 60 až 66 HRC se popouštění opakuje obvykle 3krát. [6]

#### 6.1.2 Vlastnosti rychlořezné oceli 19 830

Rychlořezná wolfram-molybden-vanadová ocel s vysokou odolností proti popouštění, s nejvyšší houževnatostí ve skupině rychlořezných ocelí, dobrou odolností proti opotřebení. Ocel je obtížně tváritelná za tepla, má zhoršenou obrobitelnost ve stavu žíhaném na měkko a je náchylnější na oduhličení při tepelném zpracování než ostatní rychlořezné oceli. [13]

#### Běžné použití rychlořezné oceli 19 830

Použití na značně namáhané nástroje pro obrábění různých materiálů o střední obrobitelnosti a pevnosti i silně přerušovaným řezem, jako speciální soustružnické nože, frézy, vrtáky, výstružníky, záhlubníky, závitníky zejména menších rozměrů, kruhové závitové čelisti, odvalovací frézy (zejména broušené), obráběcí nože, protlačovací a protahovací trny, celistvé pilové kotouče, zuby a segmenty pilových kotoučů apod. [13]

#### Požadavky na vlastnosti materiálu 1.3343 dle materiálového lexikonu [13]

Tabulka 14. Chemické složení [hm. %]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W
0,86 - 0,94	max. 0,45	max. 0,40	max. 0,030	max. 0,030	3,80 - 4,50	4,70 - 5,20	1,70 - 2,00	6,00 - 6,70

Mechanické vlastnosti materiálu ve stavu žíhaném na měkko:

Mez pevnosti  $R_m$ : 755 až 945 MPa

Tvrdost dle Brinella: 225 až 280 HB

## Požadavky na vlastnosti materiálu 1.3343 dle normy zákazníka [16]

Tabulka 15. Chemické složení [hm. %]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W
0,83 - 0,97	max. 0,48	max. 0,44	max. 0,035	max. 0,035	3,70 - 4,60	4,60 - 5,30	1,60 - 2,10	5,85 - 6,85

Mechanické vlastnosti materiálu ve stavu žíhaném na měkko:

Mez pevnosti ve stavu žíhaném na měkko norma zákazníka neuvádí.

Tvrdość dle Brinella: 240 až 300 HB

Z předešlých dvou tabulek vyplývá, že norma zákazníka povoluje širší mezní obsahy prvků v materiálu. U tvrdostí se normy překrývají v hodnotách 240 až 280 HB.

## Vlastnosti materiálu deklarované dodavatelem

Tabulka 16. Chemické složení v [hm. %]

Vzorek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W
A_1	0,910	0,25	0,24	0,028	0,001	3,82	4,87	1,790	6,230
A_2	0,907	0,26	0,26	0,025	0,002	3,82	4,87	1,800	6,230
A_3	0,905	0,25	0,25	0,028	0,003	3,85	4,88	1,800	6,200
A_4	0,912	0,29	0,26	0,028	0,003	3,85	4,90	1,790	6,210

Tabulka 17. Mechanické vlastnosti

Vzorek	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Tvrdość HB
A_1	784	233
A_2	797	238
A_3	800	238
A_4	803	239

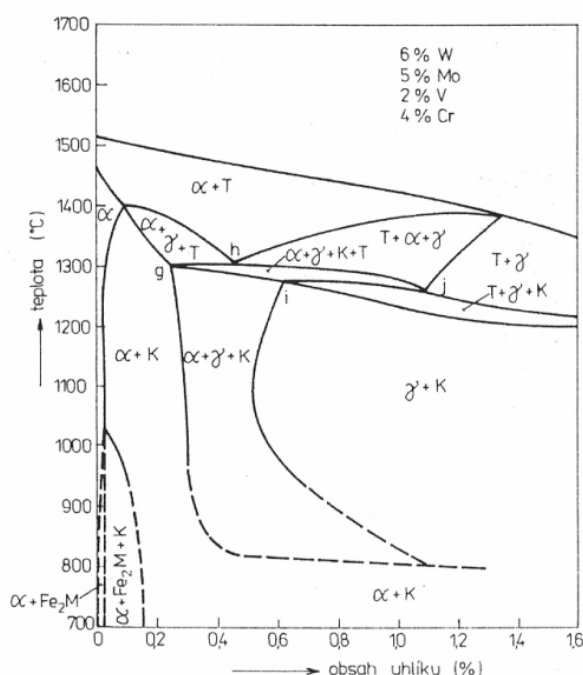
U testovaných materiálů chemické složení vyhovuje obou normám, navíc obsahy jednotlivých prvků u všech čtyřech vzorků nevykazují téměř žádnou variabilitu. Mez pevnosti vyhovuje materiálové normě, je na středu tolerance. Tvrdość testovaných materiálů normě zákazníka nevyhovuje, je pod její spodní hranicí.

Dle obsluhy strojů jsou materiály označené jako vzorky A\_1 až A\_4 od jednoho dodavatele špatně obrobitelné oproti materiálům obráběným v předešlých letech. Pro účely této práce se podařilo zajistit dva vzorky materiálu, který byl obsluhou hodnocen jako dobře obrobitelný. Zbytky tohoto materiálu jsou zablokovány ve skladu jako referenční materiál (tyto dva materiály pochází od dvou výrobců). vzorky byly označeny jako B\_1 a C\_1. K těmto dvěma vzorkům chybí deklarované vlastnosti od výrobce. Vzhledem k tomu, že lze předpokládat rozdílnost v mikrostruktuře mezi jednotlivými vzorky, byly provedeny metalografické výbrusy těchto šesti vzorků (A\_1 až A\_4, B\_1 a C\_1). Dále bylo provedeno měření tvrdosti dle Vickerse.

### 6.1.3 Problematika karbidické fáze

Hlavním důvodem pro tento postup, je zjistit, jak vypadá rozložení karbidické fáze v materiálu. Posoudit velikost karbidů a jejich možný vliv na obrobiteľnost materiálu S 6-5-2. Tento materiál je legován několika karbidotvornými prvky, jsou to W, Mo, Cr, V. Tyto prvky mají vyšší afinitu k uhlíku než železo, proto největší množství uhlíku slouží k vytvoření karbidů. Pokud dojde uhlík, potom se karbidotvorné prvky rozpouštějí v matici, kde substituují železo.

Z fázového diagramu pro tuto rychlořeznou ocel je patrné, že v oblasti kolem 0,9 % C se vyskytuje pouze ferit a karbidy.



Obrázek 64. Fázový diagram pro W-Mo-V rychlořeznou ocel [17]

V materiálu se vyskytují čtyři typy karbidů obecné značení karbidů je MC, přičemž za M se dosazuje karbidotvorný prvek a C je uhlík.

Tabulka 18. Množství karbidů v materiálu

Karbid	Prvky tvořící tento karbid	Obsah [hm. %] v materiálu
$M_6C$	$(W, Mo, Fe)_6C$	cca 11
$M_{23}C_6$	$(Cr, Fe)_{23}C_6$	cca 4
MC	FeC	nezjištěno
$M_4C_3$	$(V, Fe)_4C_3$	cca 2

Tabulka 19. Tvrdosti karbidů

Karbid	Prvky tvořící tento karbid	Tvrdost karbidů [HV]
$M_4C_3$	$(V, Fe)_4C_3$	cca 2500
$M_6C$	$(W, Mo, Fe)_6C$	cca 2100
MC	FeC	< 2100
$M_{23}C_6$	$(Cr, Fe)_{23}C_6$	< 2100

Vlastnosti karbidů:

- typ karbidů (viz výše),
- množství (viz výše),
- velikost (malé, velké),
- tvar (ostré hrany, popraskané, oblé),
- rozložení (rovnoměrné, nerovnoměrné, řádkovitost).

## 6.2 Metalografie obráběného materiálu [5]

Ačkoliv je světelná mikroskopie nejstarší metodou hodnocení struktury kovů má doposud největší vypovídající schopnost. Dává o struktuře přehledné informace a stává se tedy podkladem pro rozhodnutí, jakých dalších metod bude ke studiu struktury použito.

Příprava metalografického preparátu má svoje pravidla, která mají zajistit, aby se struktura vzorku v průběhu preparace nezměnila a nebyla jednotlivými operacemi ovlivněna. Významnou fází přípravy vzorku je i jeho odběr z výrobku, který má být metalograficky posouzen.

Způsob odběru vzorku a místo odběru vzorku, na kterém bude připraven výbrus pro pozorování struktury na světelném mikroskopu je třeba pečlivě uvážit, protože na nich záleží objektivita posouzení struktury výrobku. Technika oddělení vzorku od materiálu výrobku může strukturu buď částečně nebo zcela změnit. Je třeba dodržet zásadu, že vzorek nesmí být zahřát na teplotu případných fázových přeměn a nesmí být plasticky zdeformován. Velikost vzorku je dána způsobem přípravy výbrusu (ruční, poloautomatická, automatická) a také možnostmi použitého mikroskopu. Volí se obvykle 1 až 2 cm<sup>2</sup>.

Zásady pro odběr vzorků lze stručně vyjádřit v několika bodech:

- Vzorky je třeba odebírat z takových míst výrobku, aby bylo dosaženo věrného vystižení celkové struktury materiálu.
- Způsob odběru vzorku nesmí způsobit změnu struktury materiálu.
- U tvářených výrobků (výkovky, výlisky, vývalky) se respektuje směr toku materiálu. Podle záměru se orientuje rovina výbrusu kolmo na vlákna, rovnoběžně s vlákny nebo do míst přepokládaného výskytu technologických vad.

### 6.2.1 Příprava metalografických preparátů ze vzorku šarží

Celkem bylo připraveno 6 vzorků (A\_1 až A\_4, B\_1, C\_1). Bylo rozhodnuto, že výbrus se provede podélně s ohledem na způsob tváření tohoto materiálu tažením a to až do poloviny průřezu, aby možno hodnotit jak jádro materiálu tak i oblast těsně pod povrchem.

Ze zbytků obráběných tyčí byly uříznuty vzorky o délce cca 15 mm diamantovým kotoučem na pile Stuers Discotom-5. Následně byly vzorky zalisovány do dentakrylu na lisu Stuers Labopress-3.



Obrázek 65. Pila Stuers Discotom-5



Obrázek 66. Lis Stuers Labopress-3

Podmínky lisování:

- tlak 20 kN,
- ohřev na 180°C po dobu 6 minut,
- chlazení po dobu 3 minut.

Vzorky tyčí bylo nutné zbrousit tak, aby byl obnažen podélný průřez tyče. Broušení proběhlo na metalografické brusce Stuers Dap-7.



Obrázek 67. Bruska Stuers Dap-7

Postupně byly použity brusné papíry o zrnitosti 80, 280 a 600. Leštění vzorků bylo provedeno na stejném přístroji za použití sametových kotoučů a diamantových past o zrnitosti D3 (3  $\mu\text{m}$ ) a D1 (1  $\mu\text{m}$ ).

K vyvolání mikrostruktury byly vzorky chemicky naleptány Nítalem, což je 2% kyselina dusičná.





Obrázek 68. Metalografické preparáty

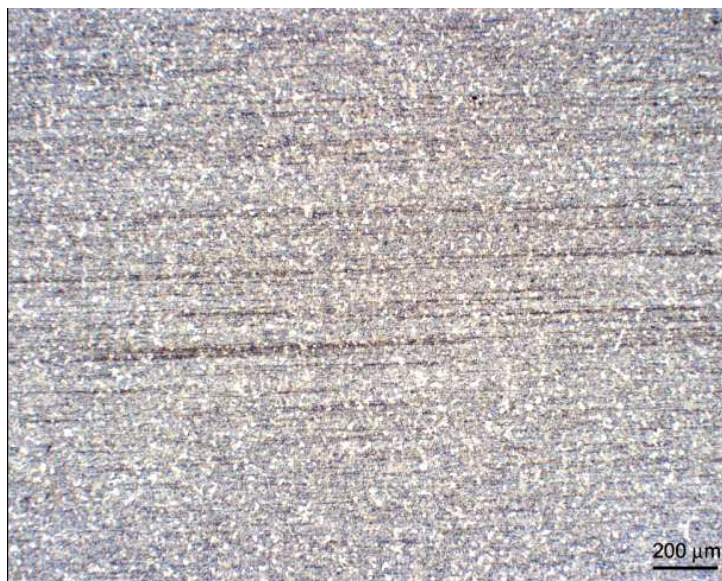
Nyní byly vzorky připraveny pro hodnocení mikrostruktury na optickém mikroskopu s možností pořizování digitálních fotografií Olympus PMG-30. Vzorky byly foceny ve 50, 100, 200, 500, 1000násobném zvětšení. Poté k nim bylo přiřazeno měřítko pro názornější porovnání velikosti zrn a velikosti karbidů mezi jednotlivými vzorky.



Obrázek 69. Světelný mikroskop Olympus PMG-30

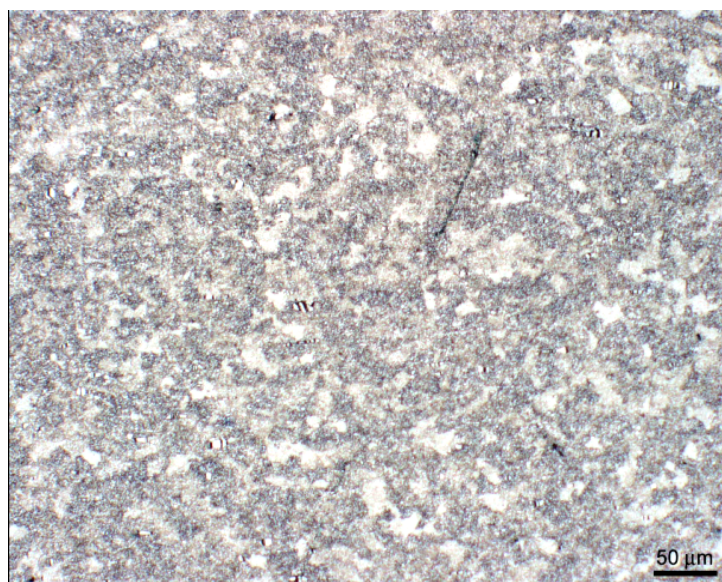
### 6.2.2 Hodnocení metalografických výbrusů

Pro názornost budou popsány obrázky metalografických výbrusů pouze třech zvětšení u vybraných vzorků materiálů. Ostatní obrázky viz přílohy 3 až 8.



Obrázek 70. Vzorek C\_1 zvětšen 50x

Při 50násobném zvětšení lze pozorovat výraznou tvářecí texturu v podobě příčných čar, která vzniká při tažení materiálu průvlaky při výrobě. Výraznost tvářecí textury je způsobena velikostí rozdílu mezi jednotlivými průvlakami a počtem operací, během kterých se materiál táhne na požadovaný průměr (tzv. redukce materiálu). Např. jenom při jednooperačním tažení bude textura výrazná zatímco při tříoperačním tažení nebude téměř znatelná. Svůj vliv také sehrává mezioperační žíhání, pokud není správně provedeno.



Obrázek 71. Vzorek B\_1 zvětšen 200x

Při 200násobném zvětšení již můžeme pozorovat hrubé primární karbidy wolframu v podobě „pruhovaných“ zrn. Dále je možné pozorovat hranice feritických zrn (bílé oblasti), z nichž lze hodnotit jemnozrnnost či hrubozrnnost materiálu.



Obrázek 72. Vzorek B\_1 zvětšen 1000x

U 1000násobného zvětšení je možné pozorovat tvary popraskaných primárních karbidů, tyto karbidy vznikají při prvotním zpracování oceli. Při tažení tyto velké karbidy popraskají, praskliny představují černé pruhy. Dále je možné vidět globulárně tvarované karbidy na feritické matici.

### 6.2.3 Porovnání mikrostruktury materiálových vzorků

Všechny vzorky odpovídají oceli ve stavu žíhaném na měkko. Mezi vzorky lze pozorovat několik rozdílů:

- tvářecí texturu,
- hrubost zrn,
- množství primárních karbidů,
- karbidickou řádkovitost.

#### Tvářecí textura

U vzorků B\_1 a C\_1 je tvářecí textura velmi výrazná u vzorků A\_1 až A\_4 není téměř patrná. Vliv na obrobitelnost, ale nelze tvářecí textuře přisuzovat. Může mít vliv při následné operaci kalení na geometrické tolerance dílců (při zahřátí se uvolní zbytkové pnutí v materiálu a dojde k jeho deformaci). Tvářecí textura je tedy z celkového pohledu na výrobu ventilkolbenů významná.

#### Hrubost zrn

Z pohledu hrubozrnnosti materiálu lze hodnotit A\_2 až A\_4 jako velmi jemnozrné materiály. U vzorků A\_1, B\_1 a C\_1 je hrubozrnější struktura, přičemž vzorek B\_1 je z pohledu zrnitosti nejhorší. Je způsobena tepelným zpracováním. Hrubost zrn může mít vliv na obrábění.

#### Karbidy

V materiálu se vyskytují všechny dříve uvedené typy karbidů. Z metalografického výbrusu není možné rozeznat typy karbidů až na primární karbidy wolframu. Tyto karbidy lze nalézt ve všech šesti vzorcích. Nevětší množství těchto hrubých primárních karbidů bylo objeveno ve vzorcích B\_1 a C\_1 o něco menší množství



u A\_1, ve kterém se vyskytují karbidy největší. U těchto třech vzorků lze také pozorovat shluky těchto karbidů, které se ale nedají nazvat řádkovitostí. Ostatní vzorky obsahují tyto velké karbidy zcela nahodile a v malém množství. Vzorek A\_2 neobsahuje téměř žádné hrubé roztrhané karbidy. Karbidy mají významný vliv na obrobitelnost rychlořezné oceli a na opotřebení nástrojů. S ohledem na známé skutečnosti, že materiály B\_1 a C\_1 se dle zaměstnanců obrábějí lépe, je možné usuzovat na pozitivní vliv hrubých karbidů na obrábění. Tím je myšleno, že karbidy vyvážané v podobě velkých potrhaných zrn opouštějí matici snadněji než jemnozrnné karbidy. Dochází k jejich vylamování. To může mít také pozitivní vliv na dělení třísky. Největší karbidy jsou až o velikosti 20  $\mu\text{m}$  vzhledem k velikosti posuvu 0,035 až 0,05 mm je tato velikost značná. Velké primární karbidy narušují homogenitu materiálu a proto jsou v materiálu nežádoucí.

#### 6.2.4 Diskuze výsledků k metalografický výbrusům

To, že karbidy obsažené ve feritické matici obrábíme karbidem wolframu v matici kobaltové, klade na nástroj velké nároky a problémy s třískovým obráběním je zde nutné předpokládat. Rozdíly ve struktuře materiálu jsou prokazatelné. Bohužel u vzorků B\_1 a C\_1 chybí chemické složení, které je ke komplexnímu hodnocení vlivu materiálu na opotřebení nástroje nezbytné. Již změna obsahu uhlíku o 0,1 % velmi ovlivňuje množství karbidů. Dále pak větší rozpětí tolerance obsahu jednotlivých legujících prvků v normě zákazníka oproti hodnotám uvedeným v materiálovém lexikonu může vést k odlišným mechanickým vlastnostem materiálu. V neposlední řadě může mít velký vliv na obrobitelnost obsah síry. Síra, jejíž množství může být podle materiálového lexikonu až 0,030 %, je u vzorku A\_1 až A\_4 deklarována na hodnotách 0,001 až 0,003 %. Síra pozitivně ovlivňuje tvorbu třísky a tím přispívá k delší životnosti nástroje.

### 6.3 Zkoušky tvrdosti [5]

Zkouška tvrdosti je rychlou a levnou zkouškou, která slouží k odhadu mechanických vlastností materiálu. Tvrdost se určuje vtlačováním indentoru (vnikajícího tělíska) definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu.

#### 6.3.1 Metody plastické interakce materiál – vnikací těleso

Nejrozšířenější zkouška tohoto typu v Evropě, Vickersova zkouška, má indentor tvaru jehlanu o čtvercové základně a vrcholovém úhlu 136°. Vickersovo číslo tvrdosti (Vickers hardness numer – v normách se označuje zkratkou HV) je definováno jako poměr zátěžné síly a plochy v tisku.

$$HV = 1,854F / d^2 \quad (4)$$

Kde  $F$  je zátěžná síla v jednotkách používaných před zavedením soustavy SI (1 kp = 9,81 N) a  $d$  je střední velikost úhlopříčky vtisku v mm. Vzhledem k tabulkám uváděným v normách (přepočet  $d$  na HV) a zkušenostem, které byly získány před zavedením soustavy SI, bylo rozhodnuto, že pro hodnocení kovových materiálů budou čísla tvrdosti i nadále uváděna ve starých jednotkách, a to jako bezrozměrná čísla.

Nezávislost tvrdosti na velikosti zátěžné síly u Vickersovy metody je výhodná tím, že měření je možné provádět i při velice malých zatíženích ( $1 \cdot 10^{-3}$ ) N. Tyto zkoušky se označují termínem mikrotvrdost. Na metalografických výbrusech je možné měřit tvrdost jednotlivých zrn, průběh tvrdosti v okolí svarového spoje, povrchové vrstvy apod. Naproti tomu poměrně malá velikost vtisku i při běžných měřeních tvrdosti podle Vickerse (standardní zatížení je 30 kp = 294 N) znamená, že deformací je zasažen malý objem materiálu, proto je tato metoda vhodná pro homogenní (válcované, tvářené) materiály a materiály s vyšší tvrdostí.

Měření proběhlo na zařízení Vickers LV-700L. Pro měření byly využity metalografické vzorky zalisované v dentakrylu. Bylo použito standardního zatížení. Zařízení Vickers LV-700L umožňuje po provedení vtisku do materiálu změřit opticky úhlopříčky a po jejich potvrzení vyhodnotí tvrdost, která se zobrazí na LCD displeji.



Obrázek 73. Zařízení Vickers LV-700L

Na každém vzorku byly provedeny tři měření a z nich byla získána průměrná hodnota, která bude dále porovnána s hodnotami, které deklaruje dodavatel. Hodnoty HV musely být pro účel této práce převedeny na hodnoty HB pomocí převodní tabulky (viz příloha 12).

Tabulka 20. Porovnání naměřených a deklarovaných hodnot

Vzorek	1. naměřená hodnota HV	2. naměřená hodnota HV	3. naměřená hodnota HV	Aritmetický průměr HV	Převod HV na HB	Tvrdost deklarovaná výrobce HB
A_1	240,0	231,7	238,5	236,7	226	233
A_2	234,5	234,9	234,6	234,7	224	238
A_3	223,9	234,0	237,0	231,6	220	238
A_4	241,6	243,7	237,4	240,9	229	239
B_1	262,5	263,5	261,9	262,6	250	x
C_1	232,8	231,6	238,6	234,3	223	x

### 6.3.2 Diskuze výsledků k tvrdosti

Z tabulky vyplývá, že naměřené hodnoty až na vzorek B\_1 neodpovídají normě zákazníka (240 až 300 HB), v některých případech leží hodnoty až o 20 HB pod spodní hranici intervalu. Spodní hodnotě uvedené v materiálovém lexikonu (225 až 280 HB) se tvrdosti vzorků přibližují. Dle naměřených hodnot vyhovují pouze vzorky A\_1, A\_4 a B\_1. U vzorků, které se přibližují spodní hranici intervalu tj. 225 HB nelze tvrdit, že jsou nevyhovující, protože rozdílnost zkoušek a převod hodnot tvrdosti může způsobit rozdíly od reálných hodnot. To nemění nic na tom, že normě zákazníka nevyhovují zcela určitě. Mezi vzorky B\_1 a C\_1 jsou rozdíly v hodnotách tvrdosti a proto nelze říci, že vliv tvrdosti na snadnost obrábění těchto testovaných materiálů je nějak podstatný.

## 6.4 Metalografie obráběcích nástrojů

Po zjištění, že se ve firmě kromě nástrojů, které se používají k obrábění nyní, nacházejí i vzorky břitových destiček dodávaných v letech 2005 a 2006, bylo rozhodnuto, že se provedou metalografické výbrusy také u nástrojů a porovnají se jejich mikrostruktury. V dnešní době se ve firmě k obrábění používají destičky vyrobené v roce 2007 a dále jsou dnes používány také destičky od jiného dodavatele o stejném složení. Vzorky tedy byly označeny jako T\_2005, T\_2006, T\_2007 a R\_2007.

### 6.4.1 Slinuté karbidy

Problematika slinutých karbidů byla částečně vyložena v teoretické části této práce. V tomto případě se jedná o slinuté karbidy wolframu  $W_2C$  slinuté za pomoci kobaltu při teplotě mezi 1300 až 1700 °C. Při slinování lze dosáhnout vysoké hustoty bez porozity. Tvrdost těchto slinutých karbidů se pohybuje okolo 1500 HV při normální teplotě.

Vlastnosti, které u těchto břitových destiček deklaruje dodavatel:

- velikost zrna,
- složení  $W_2C + Co$ .

Tyto vlastnosti nejsou s ohledem na know-how firmy uvedeny.

### 6.4.2 Příprava metalografických preparátů

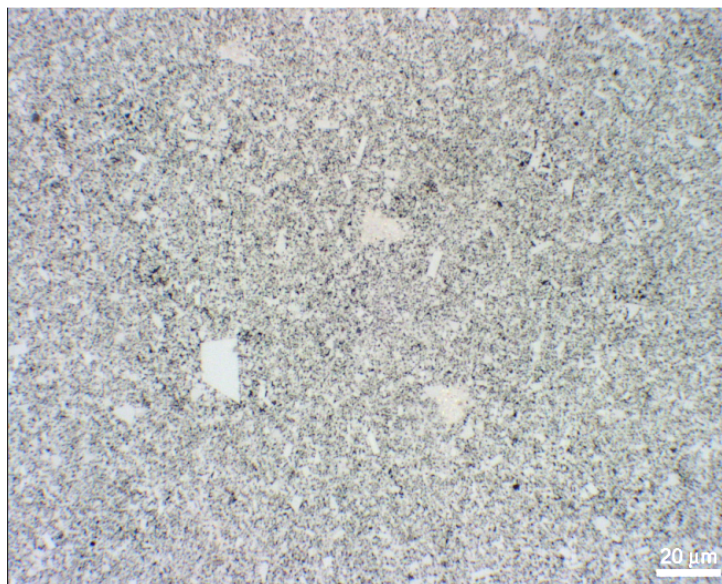
Preparáty z břitových destiček byly připraveny podobným způsobem jako tomu bylo u obráběného materiálu. S výjimkou, že ve firemní brusírně nástrojů byl obnažen hřbet nástroje od povlaku, aby bylo vůbec možné zbrousit a vyleštit dané vzorky. Dalším rozdílem bylo, že k vyvolání mikrostruktury nebyl použit Nital, ale roztok nazývaný Murakami, který slouží k leptání slinutých karbidů. Vzorky byly nafoceny ve všech zvětšeních, ale pro účel této práce budou prezentovány snímky zvětšené 500násobně a 1000násobně.



Obrázek 74. Metalografické preparáty

#### 6.4.3 Hodnocení metalografických výbrusů

Pro názornost budou popsány obrázky metalografických výbrusů pouze dvou zvětšení u vybraných vzorků nástrojů. Ostatní obrázky viz přílohy 9 až 12.



Obrázek 75. Vzorek T\_2007 zvětšen 500x

Na obrázku 500násobném zvětšení je možné pozorovat bíle geometricky ohraničené zrno karbidu wolframu o rozměru 20 μm a další větší zrna. Černé tečky představují póry mezi zrnny.





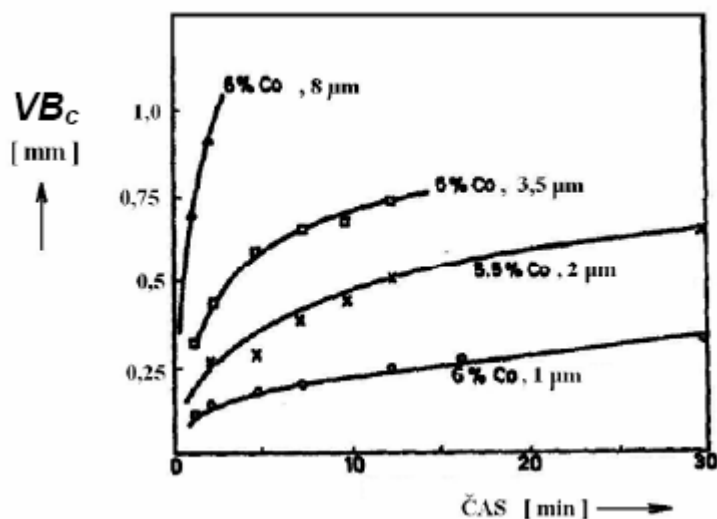
Obrázek 76. Vzorek R\_2007 zvětšen 1000x

Na obrázku v 1000násobném zvětšení je vidět jemnozrná struktura bez hrubých zrn. Černé tečky představují póry.

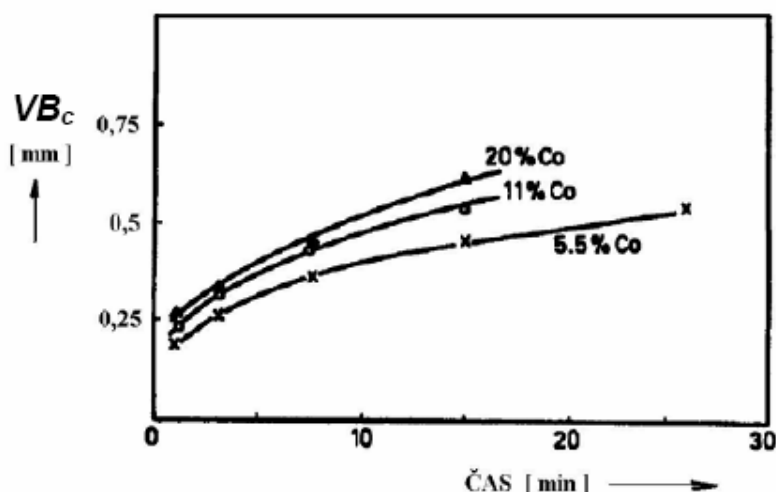
#### 6.4.4 Porovnání mikrostruktury nástrojů

U vzorků břitových destiček jsou znatelné rozdíly vzhledem k:

- hrubosti zrn,
- pórovitosti.



Obrázek 77. Vliv rozměru zrna karbidů na opotřebení  $VB_c$  [3]



Obrázek 78. Vliv obsahu kobaltu na opotřebení  $VB_c$  [3]

Z grafů je vidět, že velikost zrna má velký vliv na opotřebení, vliv obsahu kobaltu na opotřebení je zanedbatelný.

#### Hrubost zrna

Z hlediska hrubosti zrn dopadl nejhůře vzorek T\_2007, obsahuje velká zrna karbidu wolframu. U vzorku T\_2006 se také na snímku vyskytuje velké zrno trojúhelníkového tvaru.

#### Pórovitost

Nejvíce pórovité jsou vzorky T\_2007 a R\_2007, zbylé dva vzorky T\_2005 a T\_2006 jsou pórovité minimálně.

#### 6.4.5 Diskuze výsledků

Hrubost zrn je způsobena nedostatečným tříděním  $W_2C$  prášku před slinováním. Na karbidy nemá vypalovací teplota žádný vliv (teplota tavení  $W_2C$  je  $2750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), kobalt je při této teplotě zcela nataven. Přesná geometrická ohraničenost velkých zrn potvrzuje, že se hranice zrn karbidu wolframu vůbec nenatavují. Výskyt takovýchto zrn ve struktuře je nepřijatelný. Velká zrna mohou být jako koncentrátoři napětí zdrojem mikrotrhlin, která vznikají na jejich hranici. Velké zrno také mnohem snadněji opouští kobaltovou matici a dochází k jeho vylomení. Na obrázku 77 je vidět vliv velikosti zrna na rychlost opotřebení nástroje graf je pouze pro informaci, protože vliv hrubých zrn u zkoumaných vzorků nebude tak velký, z důvodu jejich malého množství. Pokud se takto velká zrna vyskytují na břitě nástroje, dochází zcela jistě k rychlejšímu opotřebování a v případě zrn o velikosti až  $20\text{ }\mu\text{m}$ , která se vyskytují ve vzorku T\_2007, může vést ke změně geometrické přesnosti soustružnického nože. Vedle hrubosti zrn hraje svou roli i pórovitost, může být způsobena nižšími lisovacími tlaky při výrobě. Jako nejlepší testovaný vzorek se z hlediska porovnávaných charakteristik jeví T\_2005.

## 7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat proces výroby, identifikovat faktory ovlivňující proces a optimalizovat proces výroby pomocí plánovaného experimentu DOE.

Proces výroby byl analyzován a jeho průběh byl následně modelován pomocí vývojových diagramů. Subproces soustružení byl rozebrán do jednotlivých činností a poté byla popsána technologie výroby ventilkolbenů a identifikovány faktory ovlivňující výrobu dílce ventilkolben.

Pro plánovaný experiment byly po dohodě s vedením zvoleny tři faktory (Doba výměny, Pracoviště a blokový faktor Šarže materiálu). Jako odezvy byly zvoleny index strojní způsobilosti  $c_m$  a maximální hloubka drsnosti  $R_{\max}$ . Po neprokázání vlivu zvolených faktorů na zkoumané odezvy bylo přistoupeno k testům materiálů. V této části byly porovnány vzorky z plánovaného experimentu spolu s referenčními vzorky materiálů, hodnocených obsluhou strojů jako lépe obrobitelné. Vzorky byly porovnány z hlediska mikrostruktury a tvrdosti. Dále byly hodnoceny vzorky obráběcích nástrojů opět z hlediska mikrostruktury.

Na základě provedených pokusů a jejich výsledků lze závěry shrnout do následujících bodů:

### DOE

- neprokázání vlivu šarží materiálu na  $c_m$  a  $R_{\max}$ ,
- neprokázání vlivu typu stroje na  $c_m$  a  $R_{\max}$ ,
- neprokázání vlivu doby výměny nástroje na  $c_m$  a  $R_{\max}$ .

### Opotřebení

- stejný typ opotřebení u všech destiček,
- průměrné opotřebení  $VB_{\max}$  ze všech měření je 0,414 mm.

### Testy materiálů

- rozdílnost v hrubosti zrn u obráběného materiálu,
- rozdílnost karbidické fáze u obráběného materiálu,
- rozdíly v tvrdosti u obráběného materiálu – některé hodnoty mimo toleranci,
- rozdílnost v hrubosti zrn a pórovitosti u nástrojů.

V této diplomové práci se nepodařilo identifikovat faktory ovlivňující zvolené odezvy, ale byly objeveny faktory, které na ně vliv nemají. Toto zjištění je argumentem pro zvýšení počtu vyrobených kusů do výměny břitových destiček a tím ušetření nákladů na nástroje. Argumentem se stejným závěrem jsou výsledky z měření opotřebení  $VB_{\max}$ , které rovněž ukazují na rezervy v nastavené životnosti břitových destiček. Ve firmě budou pokračovat další testy, opotřebení destiček do destrukce za současného sledování vývoje drsnosti povrchu. Tím bude zjištěno, jak velká je oblast lineárního opotřebení a jaký je vliv většího opotřebení na drsnost, poté mohou být nastaveny delší intervaly výměn břitových destiček. Budou také prověřeny možnosti zvýšení hodnoty posuvu, vzhledem k typu opotřebení destičky.

Dále se podařilo zjistit, že v obráběném materiálu se vyskytují rozdíly v mikrostruktuře. Tyto rozdíly mohou ovlivňovat snadnost obrábění. Pro přesné hodnocení obrobitelnosti je nutné znát chemické složení u vzorků B\_1, C\_1. Tyto testy budou firmou provedeny i se zkouškami mechanických vlastností. Při chemickém rozboru je nutné, zaměřit se zejména na obsah síry, jejíž hodnoty jsou u vzorků A\_1 až A\_4 zanedbatelné. Její povolené množství v materiálu je až třicetinasobkem obsahu ve vzorku A\_1. Síra pozitivně ovlivňuje tvorbu třísky a tím usnadňuje obrábění.

Tvrdosti jednotlivých vzorků budou diskutovány s dodavatelem materiálu a budou požadovány podrobné informace o tepelném zpracování. Z výsledků chemického složení a mechanických zkoušek vyplynou žádané vlastnosti materiálu a bude objednán materiál odpovídající požadavkům. To samozřejmě přináší vyšší náklady. Je na vedení, aby rozhodlo, zda se bude obrábět levnější, ale hůře zpracovatelný materiál, nebo dražší materiál „na míru“ odpovídající požadavkům firmy.

Poslední zjištění této diplomové práce vyvrátilo předpoklad o konstantní kvalitě dodávaných břitových destiček. Jako nejhorší z testů dopadly destičky používané v dnešní době. Vliv jejich hrubých zrn a pórovitosti na rychlost opotřebení není zanedbatelný. Na dodavateli těchto nástrojů bude vyžadována náprava tohoto stavu.

Aby bylo možné uvést některá zjištění do praxe, je zde uveden výčet doporučení a návrh dalších testů:

- rozboru chemického složení obráběného materiálu,
- požadovat od dodavatele nástroje o deklarované zrnitosti,
- provést testy opotřebení až do destrukce destičky,
- prodloužit životnost nástrojů,
- prověřit možnost zvýšení posuvu u DGV.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DILLINGER, Josef, et al. *Moderní strojírenství : pro školu a praxi*. PhDr. Miloslava Kučerová; Eva Kalenská. Praha : Europa-Sobotáles cz, s.r.o., 2007. 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [2] KOČMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 271 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [3] BUMBÁLEK, Bohumil. *Fyzikální podstata řezání*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2007. 125 s.
- [4] JAROŠOVÁ, Eva. *Navrhování experimentů*. Praha : Česká společnost pro jakost, 1997. 106 s. ISBN 80-02-01154-6.
- [5] PTÁČEK, Luděk, et al. *Nauka o materiálu I.* Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2.
- [6] PTÁČEK, Luděk, et al. *Nauka o materiálu II.* 2. rozš. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [7] FIALA, Alois. *Statistické řízení jakosti : Prostředky a nástroje pro řízení a zlepšování procesů*. Brno : VUT v Brně, 1997. 93 s. ISBN 80-214-0895-2.
- [8] GARSCHA, Joseph B. *Rozvoj organizace pomocí managementu procesů : Praktická příručka pro rozvoj systémů managementu*. Dr. Milan Gajdula. 1. vyd. Praha : Česká společnost pro jakost, 2003. 226 s. ISBN 80-02-01581-9.
- [9] ISHIKAWA, Kaoru. *Co je celopodnikové řízení jakosti? : Japonská cesta*. Ing. J. Frank. České Budějovice : Česká společnost pro jakost, 1994. 175 s. ISBN 80-02-00974-6.
- [10] BASL, J., TŮMA, M., GLASL, V. *Modelování a optimalizace podnikových procesů*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2002. 140 s. ISBN 80-7082-936-2.
- [11] SC&C Partner, spol. s r.o.. *Minitab Release 14 : Statistický software pro windows*. Brno, 2006. 73 s.
- [12] Pramet Tools, s.r.o., *Příručka soustružení*. 2006. 271 s.
- [13] FÜRBAACHER, Ivan, MACEK, Karel, STEIDL, Josef. *Lexikon technických materiálů : se zahraničními ekvivalenty*. : Verlag Dashöfer, 2001. 5 sv.
- [14] Minitab Ltd.. *Meet Minitab 15 : pro Windows*, 2007. 142 s. Dostupný z WWW: <<http://minitab.cz/>>.

- [15] Mesa Parts, s.r.o., *Interní dokumenty*. 2008, [dostupné na intranetu společnosti].
- [16] *Norma zákazníka pro rychlořeznou ocel S 6-5-2 DIN 17 350*.
- [17] FREMUT, Přemysl, KREJČÍK, Jiří, PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Nástrojové oceli*. Brno : Dům techniky Brno, 1994. 184 s.
- [18] JAROŠOVÁ, Eva, MICHÁLEK, Jiří. *Navrhování experimentů*. Praha : Konzultační středisko statistických metod při NIS - PJ, 2005. [Prezentace, 78 s.].

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\alpha$	[°]	úhel h řbetu
$\beta$	[°]	úhel b řitu
$\gamma$	[°]	úhel čela
$\varepsilon$	[°]	úhel špičky
$\kappa$	[°]	úhel nastavení
$\lambda$	[°]	úhel sklonu ostří
$r_\varepsilon$	[mm]	poloměr zaoblení špičky
$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$s$	[mm]	posuv
$a_p$	[mm]	hloubka řezu
$R_{th}$	[μm]	teoretická hloubka drsnosti
$R_{max}$	[μm]	maximální drsnost povrchu
$F_p$	[N]	třecí síla
$F$	[kp]	zátěžná síla
$d$	[mm]	střední velikost úhlopříčky vtisku
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
$M_s$	[°C]	martenzit start
$VB$	[mm]	opotřebení hřbetu průměrné
$VB_C$	[mm]	opotřebení hřbetu v oblasti špičky
$VB_N$	[mm]	opotřebení hřbetu vrubové
$VB_{max}$	[mm]	opotřebení hřbetu maximální
$KT$	[mm]	hloubka žlábků opotřebení čela
$KB$	[mm]	šířka žlábků opotřebení čela
$KM$	[mm]	poloha středu žlábků opotřebení čela
$VR$	[mm]	radiální opotřebení špičky
HRC		tvrdost podle Rockwella
HB		tvrdost podle Brinella
HV		tvrdost podle Vickerse
K		karbid
MC		metal - karbid
DOE		plánovaný experiment (Design of Experiment)
CRI		Common Rail Injection
ISO		Mezinárodní organizace pro standardizaci (Internacional Organisation for Standardization)
TS		Technická Specifikace
ABS		antiblokační systém
HSS		rychlořezná ocel (High Speed Steel)
SK		slinutý karbid
NC		číslicově řízený stroj
CNC		počítačem řízený stroj
„DGV“		část dílce ventilkolben
SPC		statistické řízení procesu (Statistical Process Control)



$C_m$	index strojní způsobilosti
$C_{mk}$	kritický index strojní způsobilosti
$U$	horní toleranční mez
$L$	dolní toleranční mez
$s$	směrodatná odchylka
$n$	počet měření
$\bar{x}$	aritmetický průměr
$x_i$	i-tá hodnota měření

## SEZNAM PŘÍLOH

<b>Příloha 1</b>	<b>Protokol strojní způsobilosti</b>
<b>Příloha 2</b>	<b>Naměřené hodnoty <math>R_{\max}</math></b>
<b>Příloha 3</b>	<b>Vzorek obráběného materiálu A_1</b>
<b>Příloha 4</b>	<b>Vzorek obráběného materiálu A_2</b>
<b>Příloha 5</b>	<b>Vzorek obráběného materiálu A_3</b>
<b>Příloha 6</b>	<b>Vzorek obráběného materiálu A_4</b>
<b>Příloha 7</b>	<b>Vzorek obráběného materiálu B_1</b>
<b>Příloha 8</b>	<b>Vzorek obráběného materiálu C_1</b>
<b>Příloha 9</b>	<b>Vzorek obráběcích nástrojů T_2005</b>
<b>Příloha 10</b>	<b>Vzorek obráběcích nástrojů T_2006</b>
<b>Příloha 11</b>	<b>Vzorek obráběcích nástrojů T_2007</b>
<b>Příloha 12</b>	<b>Vzorek obráběcích nástrojů R_2007</b>
<b>Příloha 13</b>	<b>Převodní tabulka tvrdostí [12]</b>

## Příloha 1      Protokol strojní způsobilosti

Materiál A\_1; pracoviště 64; po výměně destičky;  $c_m = 2,67$

meša parts

|||||

Protokol strojní způsobilosti

Prüfprotokoll Maschinenfähigkeit

ka kontroly: MF15405 dílec po výmene plátk

datum: 29.1.2008

strana 1 z 1

testprotokollRPC-nr (2003-06-24)

č.dílu: 10244555 [ [12.9.2007]] (479 Ventilkolben)

výrobní krok: TEST KONTROLNÍHO PLÁNU

ze dne: 28.1.2008

množství: 50 Stück

původ: stroj - CNC - 064 DECO basic13i

č. znak	typ znaku	požadovaný roz					kontrolní text
5 D2,925	rozmer - prumer - vnejši	2,9250 mm	2,9000	2,9500			

namátková kontrola	n	x	Xquer	s	min	max	cmk	cm
1 Petr Zvolánek								
29.1.2008 04:15	50	0	2,9280	0,0031	2,9230	2,9360	2,34	2,67

naměřené hodn

1	2,9250	2	2,9260	3	2,9290	4	2,9320	5	2,9280
6	2,9270	7	2,9240	8	2,9300	9	2,9240	10	2,9300
11	2,9270	12	2,9270	13	2,9300	14	2,9340	15	2,9310
16	2,9280	17	2,9260	18	2,9270	19	2,9320	20	2,9260
21	2,9280	22	2,9320	23	2,9360	24	2,9290	25	2,9320
26	2,9260	27	2,9270	28	2,9250	29	2,9240	30	2,9250
31	2,9250	32	2,9340	33	2,9260	34	2,9270	35	2,9260
36	2,9300	37	2,9230	38	2,9270	39	2,9230	40	2,9290
41	2,9320	42	2,9290	43	2,9230	44	2,9270	45	2,9260
46	2,9290	47	2,9340	48	2,9290	49	2,9280	50	2,9270

Messwert (mm)

OTG

Xq

UTG

max 2,9360

xq - 3s: 2,919

xq + 3s: 2,937

i.O

min 2,9230

xq - 4s: 2,916

xq + 4s: 2,941

i.O

Xquer 2,9280

xq - 5s: 2,912

xq + 5s: 2,944

i.O

s 0,0031

xq - 6s: 2,909

xq + 6s: 2,947

i.O

Histogramm

OTG

UTG

## Příloha 2 Naměřené hodnoty $R_{\max}$ [ $\mu\text{m}$ ]

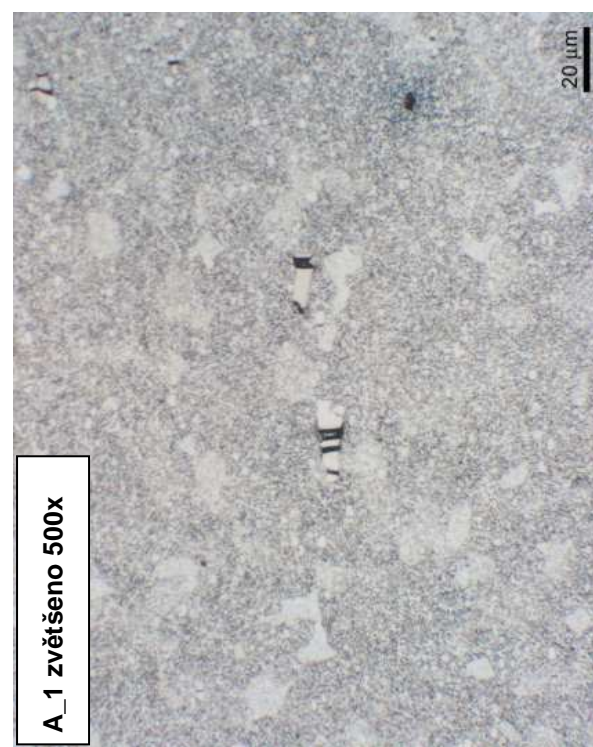
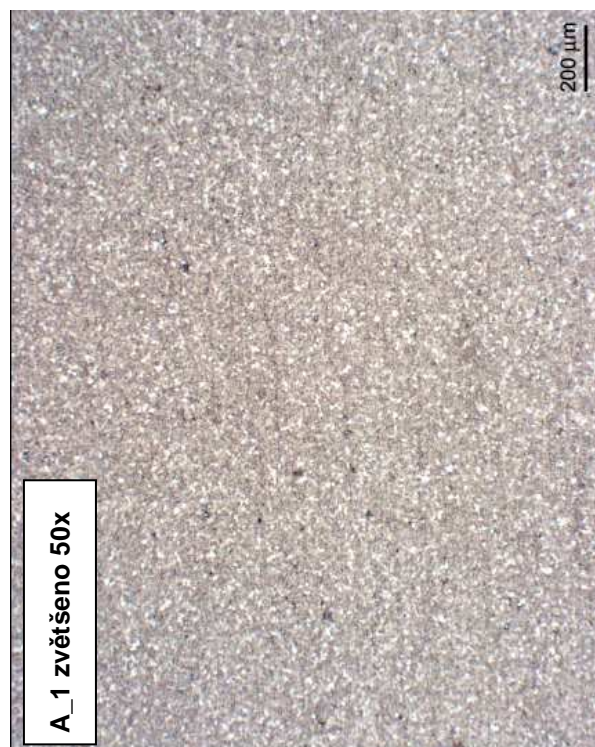
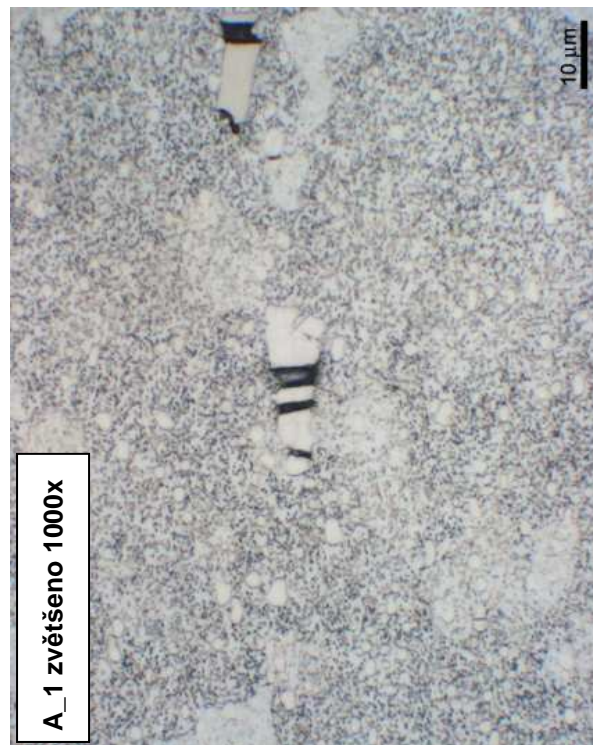
Šarže A_1	64 před	64 po	72 před	72 po
1. kus	4,96	4,10	3,52	4,07
2. kus	4,60	3,27	3,64	4,93
3. kus	3,49	4,24	4,03	4,35
Maximum	4,96	4,24	4,03	4,93

Šarže A_2	64 před	64 po	72 před	72 po
1. kus	3,07	2,95	4,60	4,87
2. kus	2,57	3,18	5,70	4,86
3. kus	2,55	2,93	4,61	4,25
Maximum	3,07	3,18	5,70	4,87

Šarže A_3	64 před	64 po	72 před	72 po
1. kus	2,47	4,47	5,16	5,09
2. kus	2,08	3,20	3,42	4,86
3. kus	3,13	3,76	4,26	5,74
Maximum	3,13	4,47	5,16	5,74

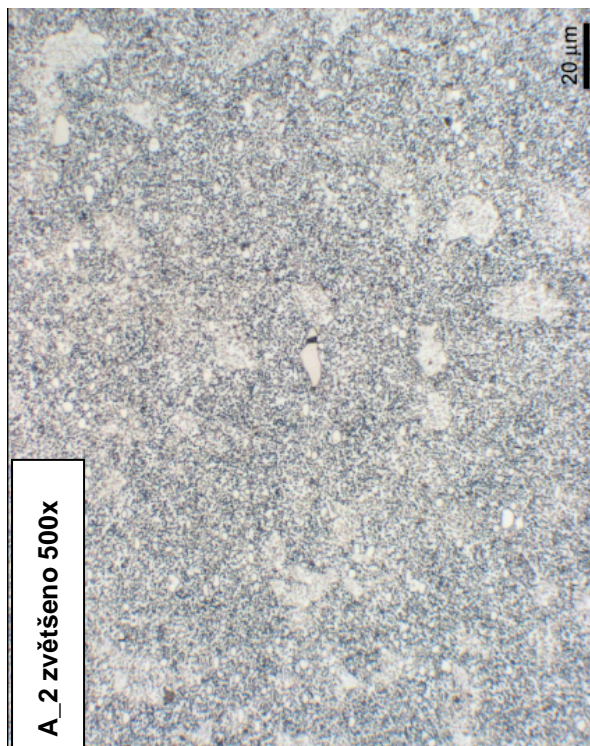
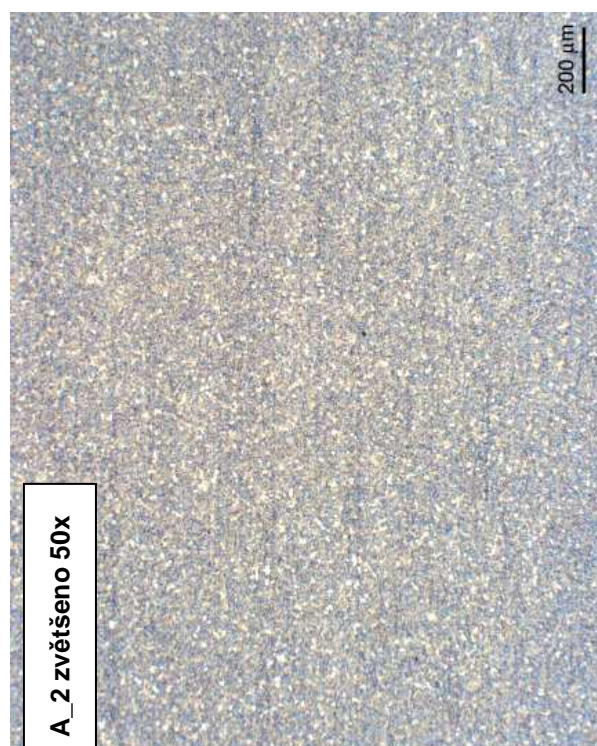
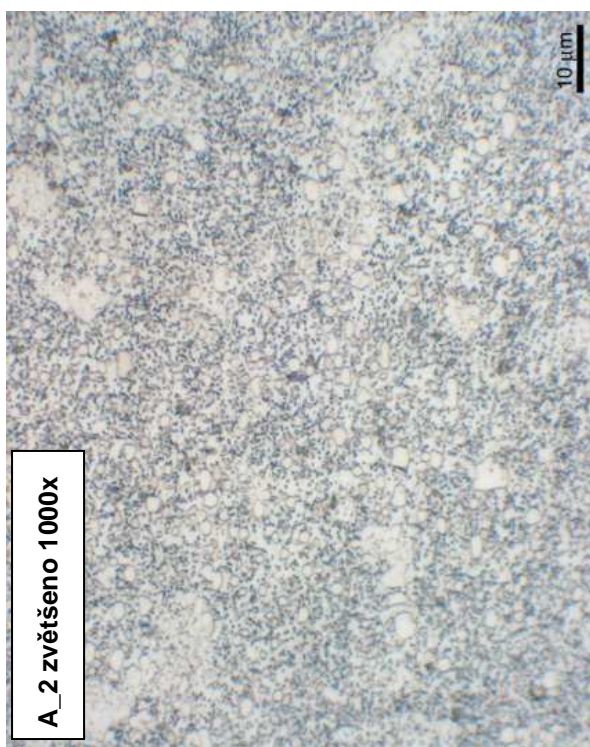
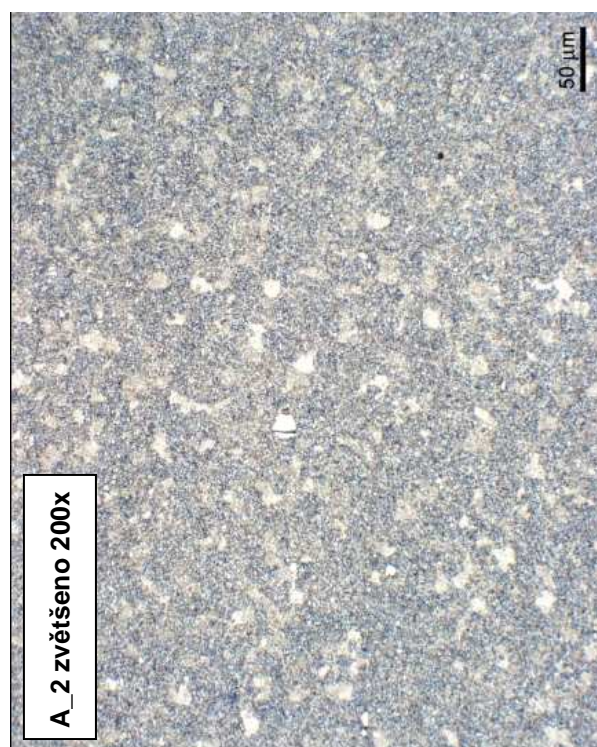
Šarže A_4	64 před	64 po	72 před	72 po
1. kus	6,16	4,07	5,84	4,36
2. kus	6,16	3,42	6,23	3,55
3. kus	5,86	3,76	5,18	4,69
Maximum	6,16	4,07	6,23	4,69

### Příloha 3 Vzorek obráběného materiálu A\_1



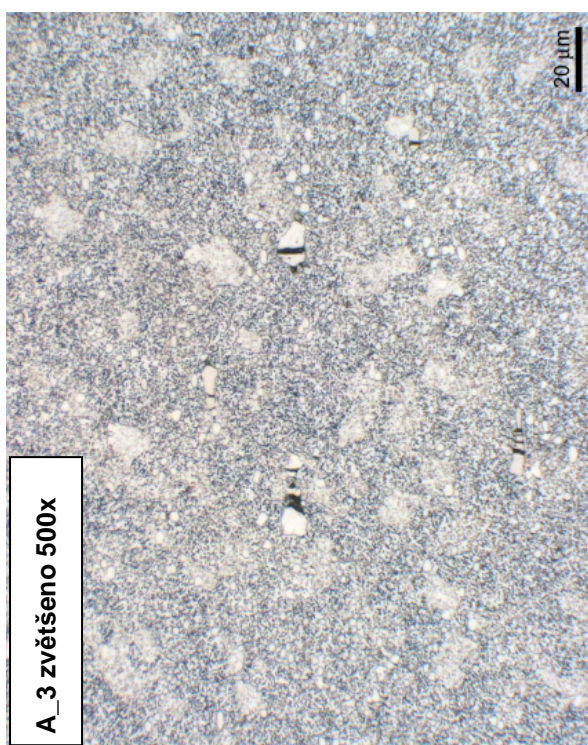
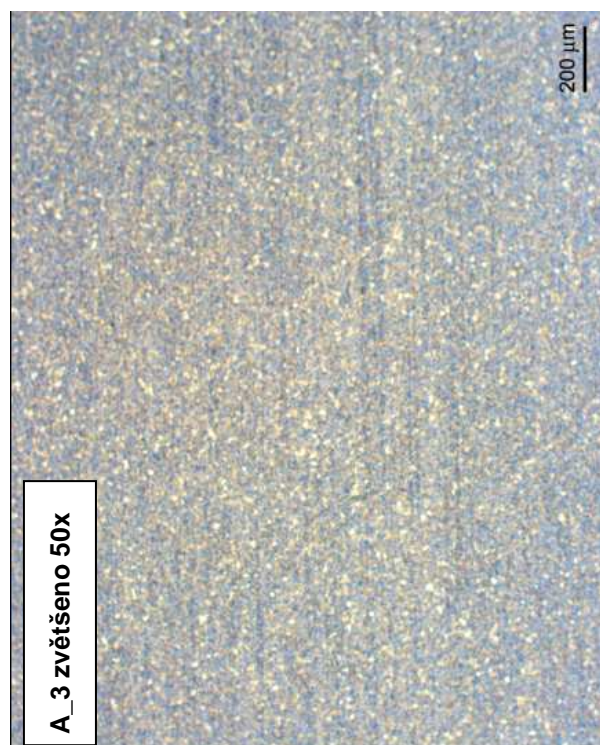
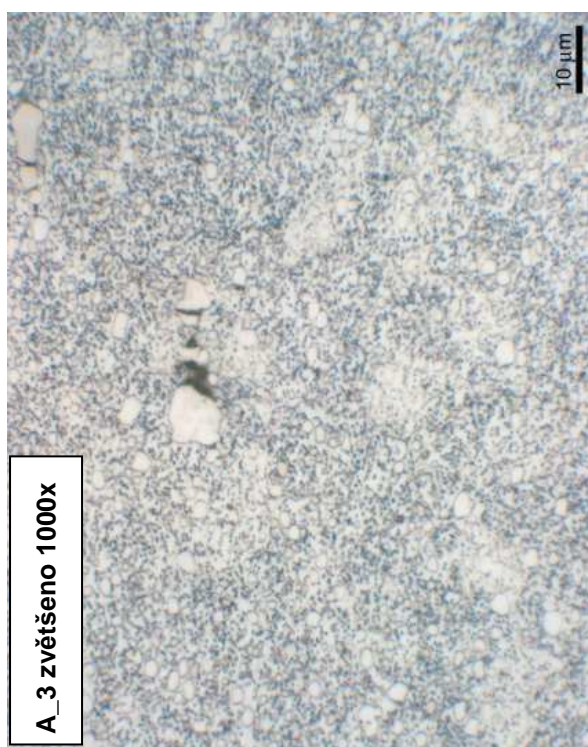
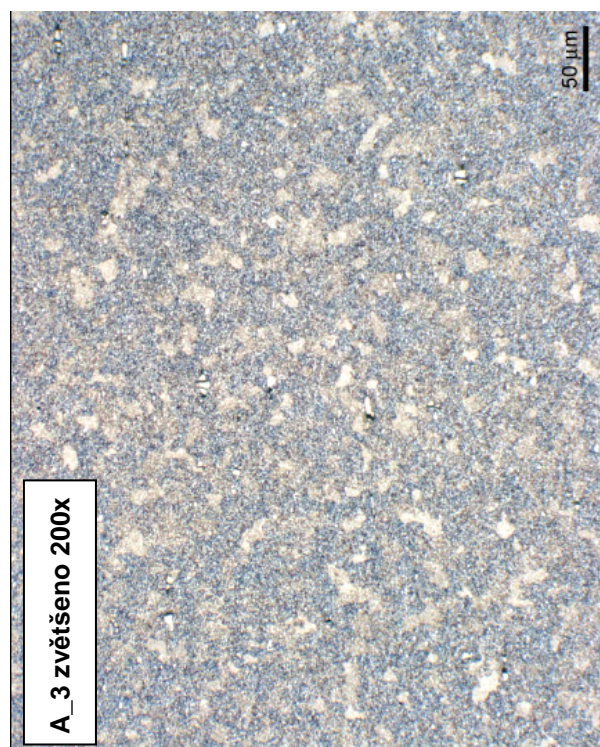


## Příloha 4 Vzorek obráběného materiálu A\_2





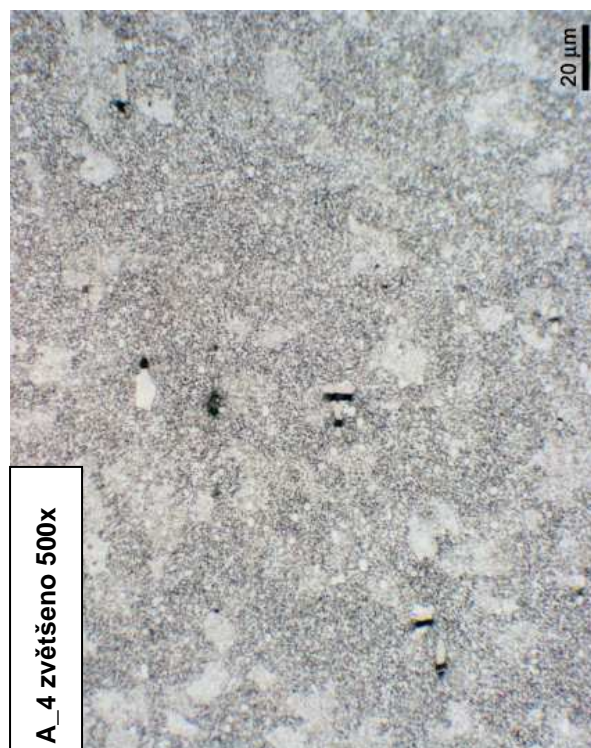
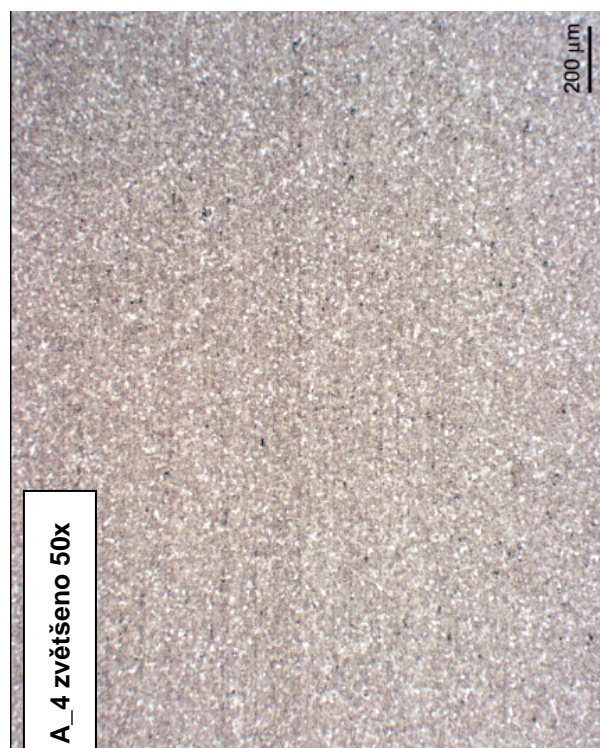
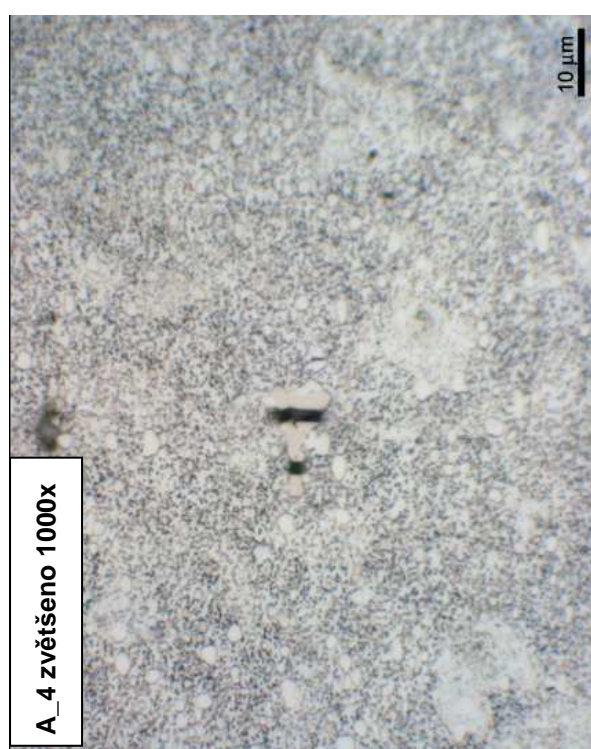
## Příloha 5 Vzorek obráběného materiálu A\_3





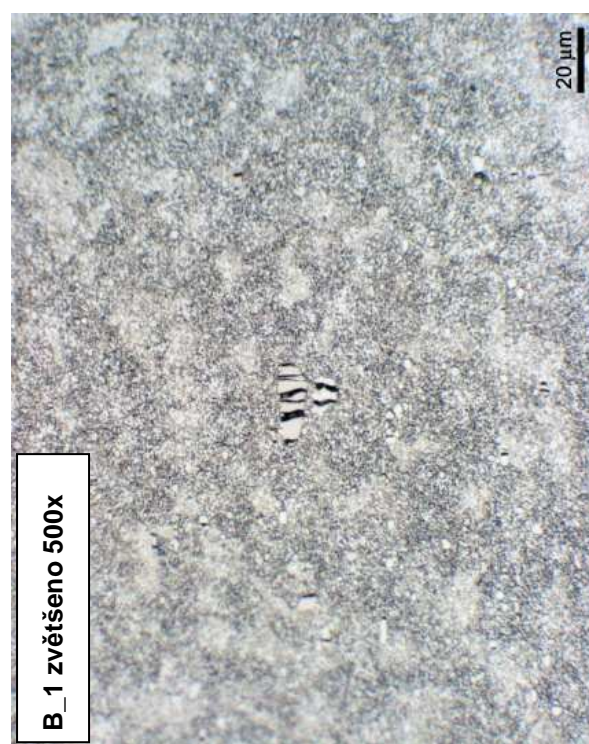
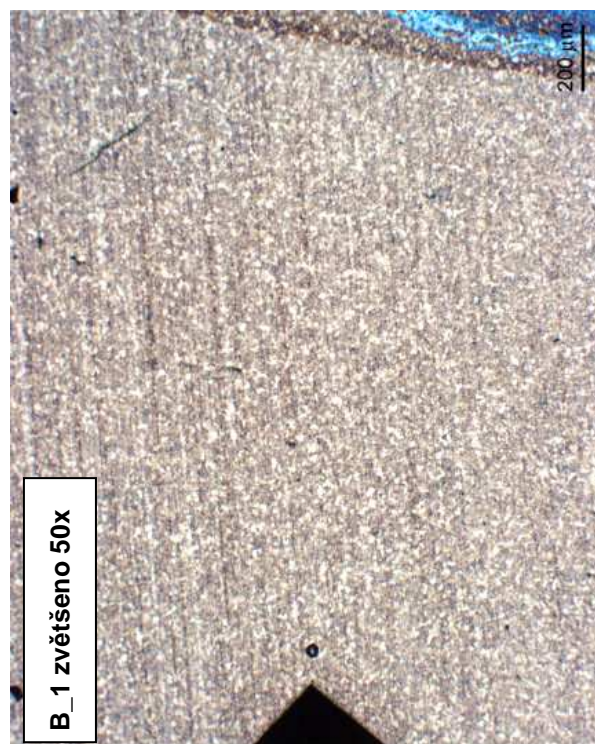
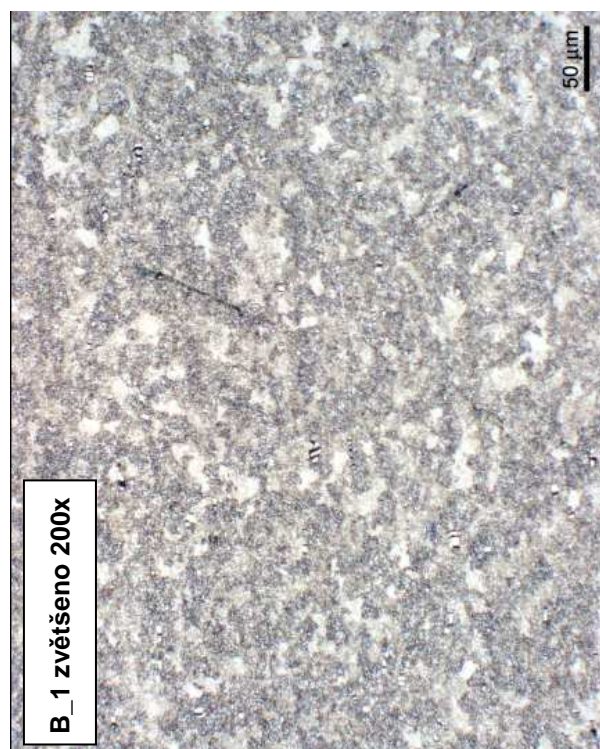
## Příloha 6

## Vzorek obráběného materiálu A\_4





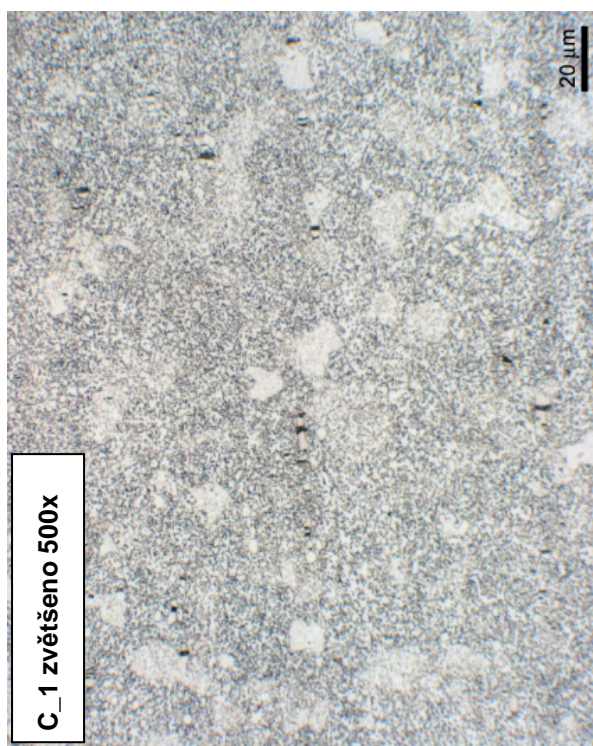
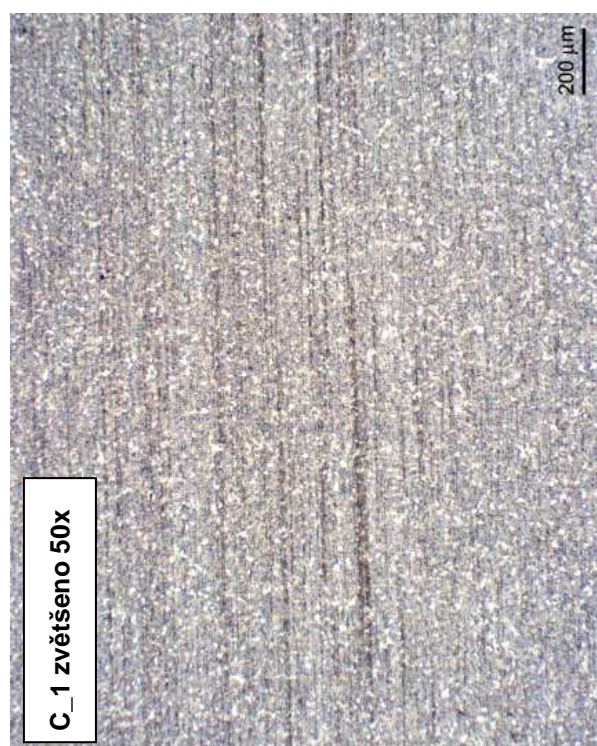
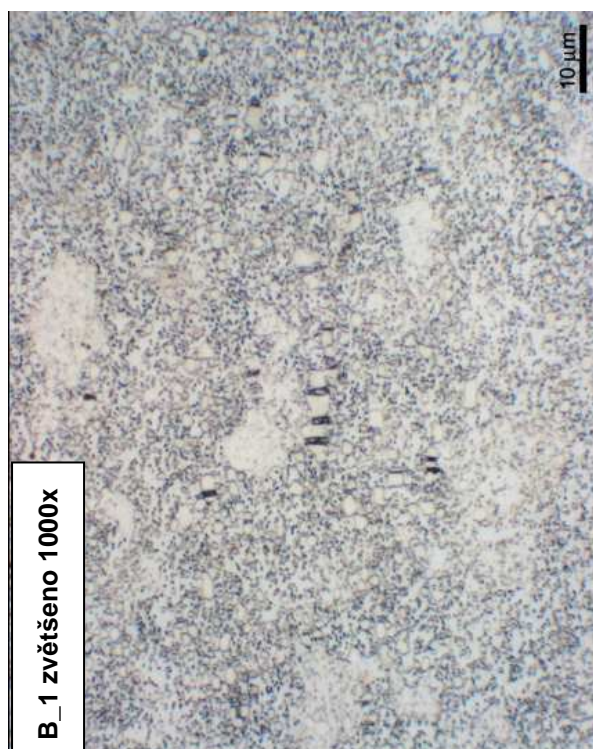
## Příloha 7 Vzorek obráběného materiálu B\_1





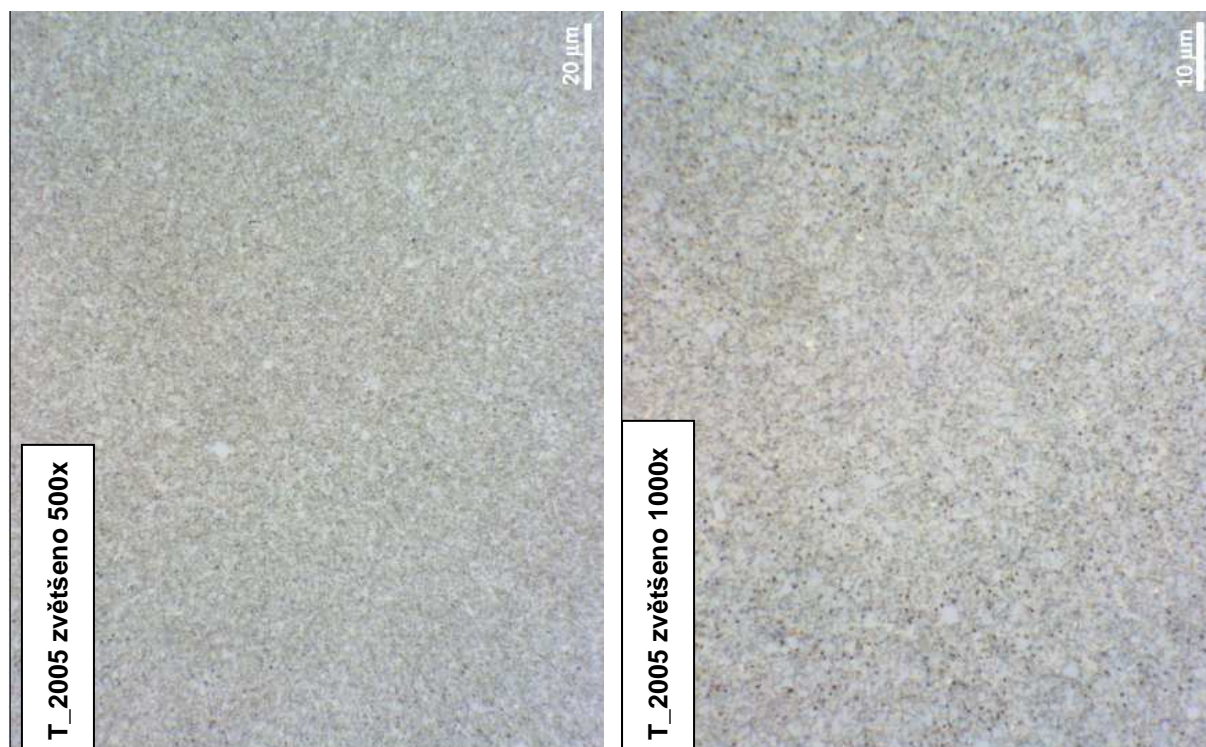
## Příloha 8

## Vzorek obráběného materiálu C\_1

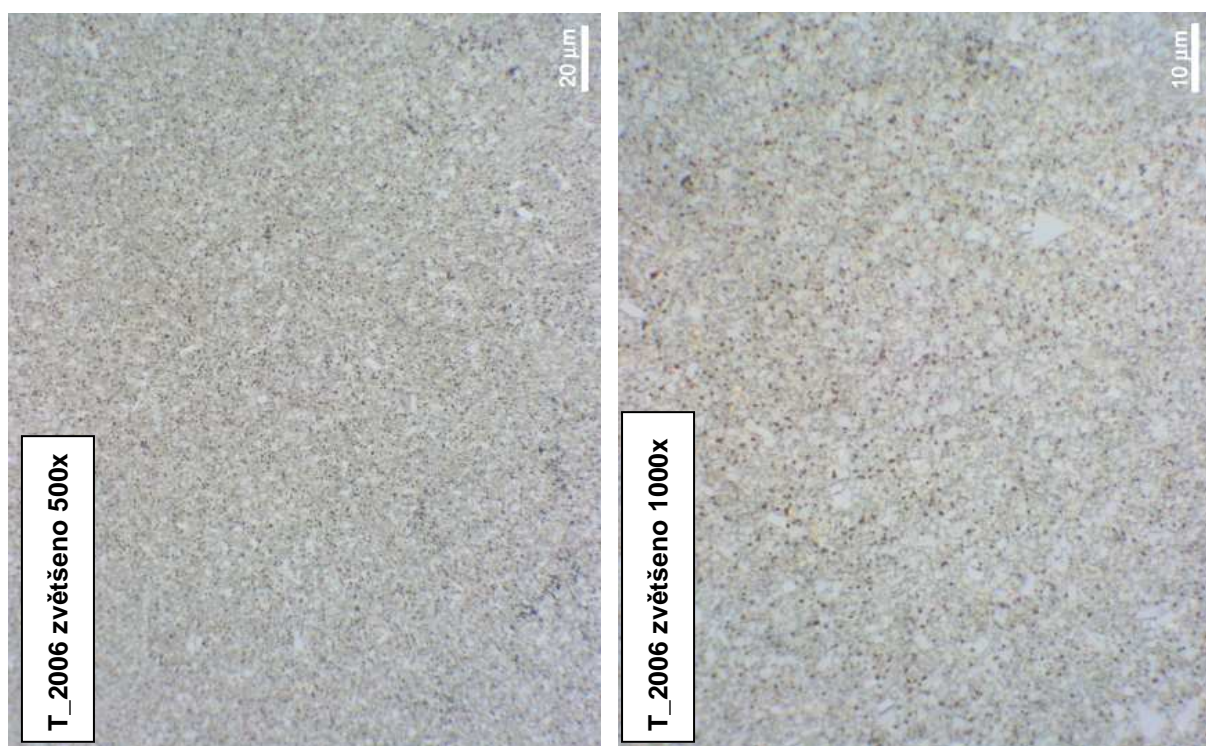




## Příloha 9 Vzorek obráběcích nástrojů T\_2005

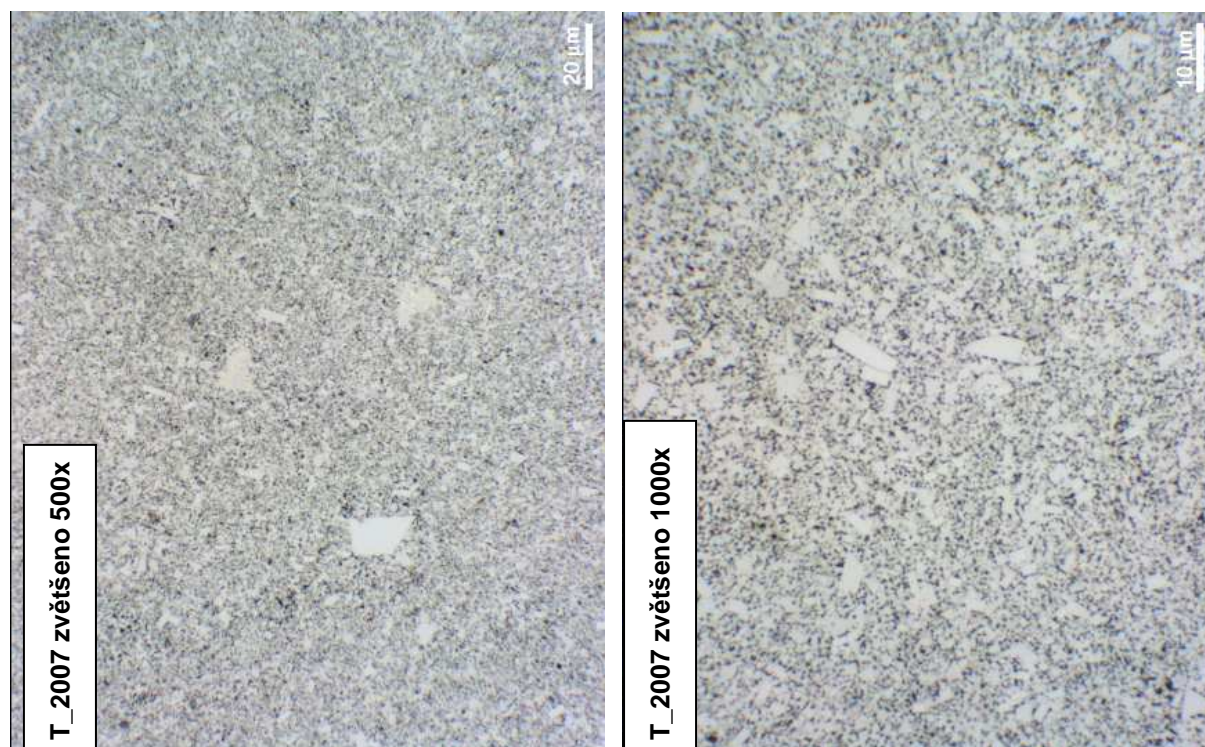


## Příloha 10 Vzorek obráběcích nástrojů T\_2006

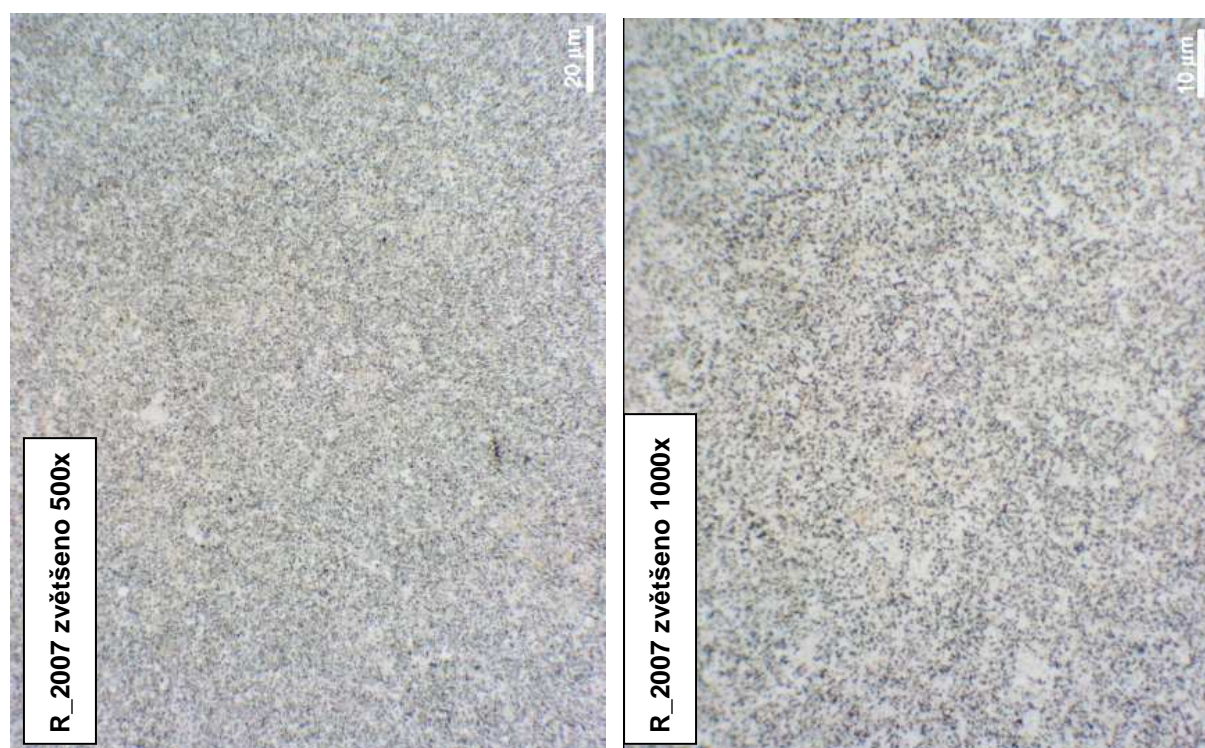




## Příloha 11 Vzorek obráběcích nástrojů T\_2007



## Příloha 12 Vzorek obráběcích nástrojů R\_2007



## Příloha 13 Převodní tabulka tvrdostí [12]

mez pevnosti [MPa] <b>R<sub>m</sub></b>	tvrdost podle BRINELLA <b>HB</b>	tvrdost podle VICKERSE <b>HV</b>	tvrdost podle ROCKWELLA <b>HRB</b>	tvrdost podle ROCKWELLA <b>HRC</b>	mez pevnosti [MPa] <b>R<sub>m</sub></b>	tvrdost podle BRINELLA <b>HB</b>	tvrdost podle VICKERSE <b>HV</b>	tvrdost podle ROCKWELLA <b>HRB</b>	tvrdost podle ROCKWELLA <b>HRC</b>
285	86	90			1190	352	370		37,7
320	95	100	56,2		1220	361	380		38,8
350	105	110	62,3		1255	371	390		39,8
385	114	120	66,7		1290	380	400		40,8
415	124	130	71,2		1320	390	410		41,8
450	133	140	75,0		1350	399	420		42,7
480	143	150	78,7		1385	409	430		43,6
510	152	160	81,7		1420	418	440		44,5
545	162	170	85,8		1455	428	450		45,3
575	171	180	87,1		1485	437	460		46,1
610	181	190	89,5		1520	447	470		46,9
640	190	200	91,5		1555	456	480		47,7
675	199	210	93,5		1595	466	490		48,4
705	209	220	95,0		1630	475	500		49,1
740	219	230	96,7		1665	485	510		49,8
770	228	240	98,1		1700	494	520		50,5
800	238	250	99,5		1740	504	530		51,1
820	242	255		23,1	1775	513	540		51,7
850	252	265		24,8	1810	523	550		52,3
880	261	275		26,4	1845	532	560		53,0
900	266	280		27,1	1880	542	570		53,6
930	276	290		28,5	1920	551	580		54,1
950	280	295		29,2	1955	561	590		54,7
995	295	310		31,0	1995	570	600		55,2
1030	304	320		32,2	2030	580	610		55,7
1060	314	330		33,3	2070	589	620		56,3
1095	323	340		34,4	2105	599	630		56,8
1125	333	350		35,5	2145	608	640		57,3
1155	342	360		36,6	2180	618	650		57,8